

DANIEL FABIAN BETTÚ

**CONECTIVIDADE E COMPARTIMENTAÇÃO DOS SISTEMAS AQUÍFEROS  
CAIUÁ E SERRA GERAL NO NOROESTE DO ESTADO DO PARANÁ**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre, Curso de Pós-Graduação em Geologia Exploratória, Departamento de Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

Orientador:

Prof. Dr. Francisco José Fonseca Ferreira

Co-orientadores:

Prof. Dr. Eduardo Salamuni

Prof. Dr. Luiz Alberto Fernandes

CURITIBA


2004

# TERMO DE APROVAÇÃO

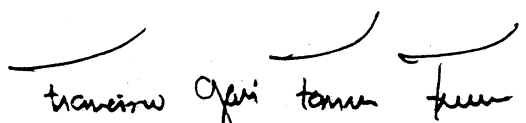
Daniel Fabian Bettú

**“CONECTIVIDADE E COMPARTIMENTAÇÃO DOS SISTEMAS  
AQÜÍFEROS CAIUÁ E SERRA GERAL NO NOROESTE DO ESTADO  
DO PARANÁ”.**

Dissertação de Mestrado aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Geologia, Área de Concentração Geologia Exploratória, Universidade Federal do Paraná. Comissão Examinadora formada por:

  
Professor Doutor André Celligoi – UEL

  
Professora Doutora Adalene Moreira Silva – IG/Unicamp

  
Professor Doutor Francisco José Fonseca Ferreira – UFPR  
Presidente

Curitiba, 30 de julho de 2004



## Agradecimentos

Algumas pessoas e instituições foram fundamentais para a realização deste trabalho. A eles é que o dedico:

a Ana, minha cara metade, que sempre me apoiou em todas as jornadas, pelas inúmeras discussões a respeito de nossos trabalhos, por sua complacência frente à minha rotineira ausência e pelas diversas vezes que prontamente me atendeu;

a minha família, em especial a meus pais, principais incentivadores do estudo como base para o sucesso pessoal e profissional, de quem herdei princípios éticos inestimáveis que carregarei comigo por toda a vida, princípios estes que espero repassar a meus filhos com a mesma competência que me foram passados;

ao Chico, meu mestre, que me guiou sabiamente pelos caminhos ambíguos da Geofísica, me ajudando a desenvolver o senso crítico necessário aos cientistas, por seu entusiasmo e dedicação à universidade e por seu compromisso com a qualidade de nossos trabalhos, além de sua paciência frente às minhas freqüentes dúvidas;

a meus co-orientadores Eduardo Salamuni e Luiz Alberto Fernandes, pelos conselhos e sugestões que ajudaram a elevar o rigor científico deste trabalho e pela prontidão que sempre dispensaram a mim;

aos amigos Rodoilton Stevanato, Carlos Vieira Portela Filho e Paulo Cesar Soares pelas importantíssimas discussões pertinentes ao desenvolvimento da pesquisa;

a meus cunhados Junior e Priscila pela tradução do *Abstract*;

aos amigos que sempre mostraram interesse pelo trabalho e me ajudaram das mais variadas formas;

a Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar), através da geóloga Ester Amelia Assis Mendes e à Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (Suderhsa), através do geólogo Mário Kondo, pela cessão dos dados hidrogeológicos;

ao Projeto Modres, do Departamento de Geologia da UFPR, através dos geólogos Sidnei Pires Rostirolla e Rafael Correia de Freitas pela cessão das imagens de satélite;

a Petrobras pela cessão dos dados aerogeofísicos ao Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada, e que foram utilizados neste trabalho; e

ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela concessão de Bolsa de Mestrado, Fundo Setorial CT-HIDRO, processo n. 132060/2002-7.

“O insensato que reconhece sua insensatez é um sábio. Porém um insensato que se crê sábio é, em verdade, um insensato.”

**Sidhartha Gautama Buda**

# Sumário

1	Introdução	1
2	Objetivos	5
3	Localização da área de estudo	7
4	Caracterização geológica	8
5	Materiais e métodos	15
6	Análise estrutural de sub-superfície	17
	<b>6.1. Pré-processamento</b>	<b>18</b>
	6.1.1. Geração de malha regular	18
	6.1.2. Micronivelamento	18
	<b>6.2. Processamento</b>	<b>21</b>
	6.2.1. Espectro de potência radial	21
	6.2.2. Filtros passa-baixa e passa-banda	22
	6.2.3. Continuações ascendentes	26
	6.2.4. Sinal analítico	29
	6.2.5. Fase do sinal analítico	33
	6.2.6. Gradiente horizontal total	36
	6.2.7. Deconvolução de Euler	39
	<b>6.3. Arcabouço magnético-estrutural</b>	<b>49</b>
7	Análise estrutural de superfície	51
	<b>7.1. Modelo numérico do terreno (MNT)</b>	<b>51</b>
	<b>7.2. Imagem Landsat 7 – Sensor ETM+</b>	<b>51</b>
	<b>7.3. Análise morfoestrutural da rede de drenagem</b>	<b>55</b>
	<b>7.4. Arcabouço estrutural aflorante</b>	<b>58</b>
8	Análise integrada dos alinhamentos	60
	<b>8.1. Arcabouço estrutural comum</b>	<b>60</b>
9	Contexto hidrogeológico	62

	<b>9.1. Potenciometria</b>	<b>63</b>
	9.1.1. Análise Variográfica	64
	9.1.2. Krigagem anisotrópica com tendência externa	65
	9.1.3. Validação Cruzada	66
	<b>9.2. Vazão</b>	<b>68</b>
	<b>9.3. Capacidade específica</b>	<b>70</b>
	<b>9.4. Sólidos totais dissolvidos – STD</b>	<b>71</b>
	<b>9.5. Potencial hidrogeniônico – pH</b>	<b>73</b>
	<b>9.6. Hidroquímica</b>	<b>75</b>
10	<b>Discussão dos resultados</b>	<b>80</b>
	<b>10.1. Geofísica</b>	<b>80</b>
	<b>10.2. Análise estrutural de superfície</b>	<b>81</b>
	<b>10.3. Arcabouço estrutural comum</b>	<b>83</b>
	<b>10.4. Contexto Hidrogeológico</b>	<b>83</b>
	10.4.1. Potenciometria	83
	10.4.2. Vazão	84
	10.4.3. Capacidade específica	84
	10.4.4. Sólidos totais dissolvidos	85
	10.4.5. Potencial hidrogeniônico	85
	10.4.6. Hidroquímica	86
11	<b>Conclusões</b>	<b>88</b>
12	<b>Referências bibliográficas</b>	<b>90</b>

## Lista de Figuras

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo e compartimentos geológicos do estado do Paraná _____	7
Figura 2 - Mapa geológico simplificado da região (CPRM 2001) _____	8
Figura 3 - Coluna litoestratigráficas da Bacia Bauru. Convenções <b>U.</b> Fm Uberaba; <b>T.</b> Analcimitos Taiúva; <b>Q.</b> Sedimentos aluviais quaternários (Fernandes e Coimbra 1996) _____	9
Figura 4 - Mapa do arcabouço estrutural da Bacia do Paraná (Zalán <i>et al.</i> 1987), indicando a área de estudo. _____	11
Figura 5 - Modelo evolutivo da Bacia Bauru (Fernandes e Coimbra 1996) _____	12
Figura 6 - Reconstrução paleogeográfica da Bacia Bauru (Fernandes, 1992), mostrando a localização aproximada da área de estudo _____	13
Figura 7 - Fluxograma mostrando a seqüência resumida das atividades desenvolvidas _____	15
Figura 8 - Modelo de integração entre os diversos mapas temáticos gerados _____	16
Figura 9 - Mapa de linhas de vôo e de controle da área de estudo _____	17
Figura 10 - Mapa magnético residual da área de estudo _____	19
Figura 11 - Mapa magnético residual micronivelado por gridagem bidirecional _____	20
Figura 12 - Mapa magnético residual micronivelado por decorrução FFT _____	20
Figura 13 - Espectro de potência radial da área estudada e profundidades estimadas das fontes magnéticas _____	23
Figura 14 - Mapa das anomalias de fontes profundas (comprimentos de onda maiores que 25 km) _____	24
Figura 15 - Mapa das anomalias de fontes intermediárias (comprimentos de onda entre 4,7 e 25 km) _____	25
Figura 16 - Mapa das anomalias de fontes intermediárias e rasas (comprimentos de onda entre 1,3 e 25 km) _____	26
Figura 17 - Mapa magnético residual continuado para a altitude de 1000 m _____	28
Figura 18 - Mapa magnético residual continuado para a altitude de 2000 m _____	28
Figura 19 - Mapa magnético residual continuado para a altitude de 4000 m _____	29

Figura 20 - Esboço do método do sinal analítico, modificado de Roest <i>et al.</i> (1992)	31
Figura 21 - Amplitude do sinal analítico de ordem zero para a os dados originais (450 m)	31
Figura 22 - Amplitude do sinal analítico de ordem zero para a continuação a 1000 m	32
Figura 23 - Amplitude do sinal analítico de ordem zero para a continuação a 2000 m	32
Figura 24 - Amplitude do sinal analítico de ordem zero para a continuação a 4000 m	33
Figura 25 - Fase do sinal analítico de ordem zero para os dados originais (450 m)	34
Figura 26 - Fase do sinal analítico de ordem zero para a continuação de 1000 m	35
Figura 27 - Fase do sinal analítico de ordem zero para a continuação a 2000 m	35
Figura 28 - Fase do sinal analítico de ordem zero para a continuação a 4000 m	36
Figura 29 - Mapa do gradiente horizontal total de ordem zero para os dados originais (450 m)	37
Figura 30 - Mapa do gradiente horizontal total de ordem zero para a continuação a 1000 m	38
Figura 31 - Mapa do gradiente horizontal total de ordem zero para a continuação a 2000 m	38
Figura 32 - Mapa do gradiente horizontal total de ordem zero para a continuação a 4000 m	39
Figura 33 - Confiabilidade das soluções produzidas pela deconvolução de Euler	43
Figura 34 - Mapa de soluções de Euler para os dados originais (450 m), janela de busca de 3500 m e índice estrutural 0	44
Figura 35 - Histograma de frequência de soluções de profundidades de Euler para os dados originais (450 m - janela de 3500 m e índice estrutural 0)	44
Figura 36 - Mapa de soluções de Euler para a continuação a 1000 m, janela de busca de 5000 m e índice estrutural 1	45
Figura 37 - Histograma de frequência de soluções de profundidades de Euler para a continuação de 1000 m (janela de 5000 m e índice estrutural 1)	45
Figura 38 - Mapa de soluções de Euler para a continuação a 1000 m, janela de busca de 10000 m e índice estrutural 0,5	46

Figura 39 - Histograma de freqüência de soluções de profundidades de Euler para a continuação a 1000 m (janela de 10000 m e índice estrutural 0,5)	46
Figura 40 - Mapa de soluções de Euler para a continuação a 2000 m, janela de busca de 1000 m e índice estrutural 0	47
Figura 41 - Histograma de freqüência de soluções de profundidades de Euler para a continuação a 2000 m (janela de 10000 m e índice estrutural 0)	47
Figura 42 - Mapa de soluções de Euler para a continuação a 2000 m, janela de busca de 10000 m e índice estrutural 1	48
Figura 43 - Histograma de freqüência de soluções de profundidades de Euler para a continuação a 2000 m (janela de 10000 m e índice estrutural 1)	48
Figura 44 - Mapa de soluções de Euler para a continuação a 4000 m, janela de busca de 10000 m e índice estrutural 0	49
Figura 45 - Histograma de freqüência de soluções de profundidades de Euler para a continuação a 4000 m (janela de 10000 m e índice estrutural 0)	49
Figura 46 - Arcabouço magnético-estrutural do embasamento da Bacia Bauru na área de estudo sobreposto ao mapa magnético residual original – A – Zona de Falha Candido de Abreu – Campo Mourão; B – Lineamento de São Sebastião; C – Falha do Rio Alonzo	50
Figura 47 - Relevo sombreado do modelo numérico do terreno, pseudo-iluminado na direção 315°	53
Figura 48 - Imagem Landsat 7, cenas 223/76 e 223/77, composição R1G2B3	54
Figura 49 - Alinhamentos estruturais extraídos da integração entre o MNT e a imagem Landsat	54
Figura 50 - Rede de drenagem da área de estudo	56
Figura 51 - Interpretação morfoestrutural da rede de drenagem	57
Figura 52 - Alinhamentos de drenagem	58
Figura 53 - Arcabouço estrutural aflorante na região sobreposto ao MNT, pseudo-iluminado na direção N45°	59
Figura 54 - Arcabouço estrutural comum a superfície do Grupo Caiuá e ao seu embasamento, pseudo-iluminado na direção N45°E, sobreposto ao mapa magnético residual original	61
Figura 55 - Perfil esquemático mostrando as relações de contato entre o Grupo Caiuá e a Formação Serra Geral, modificado de Celligoi (2000)	62
Figura 56 - Posicionamento dos poços contemplados neste estudo	63

Figura 57 - Diagrama de dispersão entre as cotas dos poços e do nível estático, ambas em metros. Coeficiente de correlação $R=0,98$	64
Figura 58 - Variogramas dos resíduos da tendência externa (MNT) segundo as direções N-S (a), NE-SW (b), E-W (c) e NW-SE (d). A linha contínua representa o modelo exponencial ajustado	65
Figura 59 - Mapa de contorno da superfície potenciométrica, construído através de krigagem com tendência externa do MNT	67
Figura 60 - Diagrama de dispersão entre os valores medidos e estimados (pela krigagem com tendência externa) do nível estático, ambos em metros. Coeficiente de correlação $R=0,98$	67
Figura 61 - Histograma de frequência das vazões nos testes de bombeamento, classes de $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$	69
Figura 62 - Mapa de vazão, incluindo o arcabouço estrutural comum, as isópacas do Grupo Caiuá e a localização dos poços, exibindo as zonas mais produtivas (hachuras)	70
Figura 63 - Histograma de frequência da capacidade específica, classes de $0,075 (\text{m}^3/\text{h})/\text{m}$	71
Figura 64 - Mapa de capacidade específica, incluindo o arcabouço estrutural comum, as isópacas do Grupo Caiuá e a localização dos poços, exibindo as zonas mais produtivas (hachuras)	72
Figura 65 - Histograma de frequência dos teores de STD, classes de $5 \text{ mg/L}$	73
Figura 66 - Mapa de teores de STD, incluindo o arcabouço estrutural comum, as isópacas do Grupo Caiuá e a localização dos poços, exibindo as zonas com maiores teores (hachuras)	74
Figura 67 - Mapa do pH, incluindo o arcabouço estrutural comum, as isópacas do Grupo Caiuá e a localização dos poços, exibindo os blocos mais elevadas (hachuras)	75
Figura 68 - Diagrama modificado de Piper referente aos poços completados no Sistema Aquífero Caiuá. Dados de Celligoi (2000)	78
Figura 69 - Mapa de composição ternária $R(\text{Na}^+)-G(\text{K}^+)-B(\text{Mg}^{++} + \text{Ca}^{++})$ dos poços completados no Sistema Aquífero Caiuá, indicando as áreas de composição potássica (zonas hachuradas), o arcabouço estrutural comum e as isópacas do Grupo Caiuá	79



## Lista de Tabelas

<b>Tabela 1:</b> Comparação entre os valores da malha original do campo magnético residual e os resultantes dos procedimentos de micronivelamento_____	21
<b>Tabela 2:</b> Comparação estatística entre as malhas do MNT e da superfície potenciométrica (valores em metros)_____	68
<b>Tabela 3:</b> Estatísticas dos dados originais de vazão, em $\text{m}^3/\text{h}$ _____	68
<b>Tabela 4:</b> Estatísticas dos dados originais de capacidade específica, em $\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$ _____	71
<b>Tabela 5:</b> Estatísticas dos dados originais de STD, em $\text{mg}/\text{L}$ _____	73
<b>Tabela 6:</b> Estatísticas dos dados originais de pH _____	74
<b>Tabela 7:</b> Resultados do balanço iônico _____	76

## **Resumo**

Este trabalho utilizou dados geológicos, geofísicos, hidrogeológicos e de sensoriamento remoto para a elaboração de um modelo do arcabouço estrutural da Bacia Bauru. A área de estudo está localizada no estado do Paraná (região sul do Brasil) e compreende arenitos depositados durante o Cretáceo superior (Grupo Caiuá) sobre os basaltos da Formação Serra Geral (Cretáceo inferior da Bacia do Paraná). As duas unidades compreendem importantes sistemas aquíferos na região. O arcabouço estrutural dos arenitos foi determinado a partir de dados de cenas do sensor ETM+ do satélite Landsat 7 e do modelo numérico de terreno (MNT) com a intenção de mapear falhas e fraturas que controlam a condutividade hidráulica. A análise de dados aeromagnéticos forneceu informações sobre a extensão sub-superficial das estruturas identificadas na superfície, bem como sua geometria e continuidade a profundidades superiores a 5000 metros. Esta análise foi combinada com variáveis hidrogeológicas (vazão, capacidade específica, sólidos totais dissolvidos e pH) e hidroquímicas extraídas de 222 poços usando um Sistema de Informações Geográficas (SIG). Os resultados mostraram uma relação direta entre as informações obtidas nos poços e as estruturas identificadas, definindo zonas de conexão entre os dois sistemas aquíferos.

## **Abstract**

This thesis uses multiples geologic, geophysical, hydrologic and remote sensing data to construct a structural model of Bauru Basin. The study area is located in north-western region of Paraná State (south of Brazil), and comprised of upper Cretaceous sandstones (Caiuá Group) that upperlie late Cretaceous basalts of Paraná Basin (Serra Geral Formation). Both units act as aquifer systems. Structural framework were determined from analysis of Digital Terrain Model (DTM) and Landsat data for the sandstones to map locations of faults and fractures that control hydraulic conductivity. Aeromagnetic analysis yielded information on the subsurface extension depth to, and geometry of the basalts and continuity and connectivity of surface shear structures to depths up 5000 meters. These analyses were combined with hydrochemical and hydrogeological variables from 222 wells using a Geographic Informations System (GIS). Results show a direct relation between the well information and structural interpretatrions provided by the thematic information and define the hydraulic connection between two aquifer system.

## 1 Introdução

O propósito deste estudo foi o desenvolvimento de um modelo estrutural integrado do Grupo Caiuá e de seu embasamento (Formação Serra Geral), no noroeste do estado do Paraná, fazendo uso de dados multifonte, visando compreender as relações existentes entre as estruturas geológicas e o comportamento hidrogeológico do Sistema Aqüífero Caiuá e sua conectividade com o Sistema Aqüífero Serra Geral.

Segundo Fernandes e Coimbra (1996), a Bacia Bauru (Cretáceo Superior) ocupa uma área aproximada de 370.000 km<sup>2</sup> da porção centro-sul da Plataforma Sul-americana. No Brasil, estende-se através da parte oriental do estado de Mato Grosso do Sul, sul de Goiás, parte do Triângulo Mineiro, planalto ocidental de São Paulo, noroeste do estado do Paraná, bem como em uma pequena porção do Paraguai. Trata-se de uma seqüência siliciclástica continental, essencialmente psamítica, associada a rochas vulcânicas, depositada sobre as rochas basálticas da Formação Serra Geral, separadas por uma discordância erosiva. No estado do Paraná o Grupo Caiuá (ambiente de deposição desértico), representa um importante sistema aqüífero, regionalmente do tipo livre, fortemente condicionado pela predominância de porosidade granular das rochas psamíticas, porém, localmente, também sob marcante influência estrutural, diagenética e hidrotermal (silicificação). Tressoldi *et al.* (1990, *apud* Barison, 2003), analisando os arenitos da Bacia Bauru no estado de São Paulo, constataram a influência destas estruturas no comportamento hidrogeológico, no controle da condutividade hidráulica, além de influenciar, em caráter local, a percolação das águas deste sistema aqüífero. Por outro lado, é ampla a utilização do Sistema Aqüífero Serra Geral, no noroeste do estado do Paraná, como fornecedor de água alojada e conduzida nestas rochas através de fraturas e intervalos amigdaloidais.

A estratégia de exploração dos sistemas aqüíferos Caiuá (granular) e Serra Geral (fissural), ambos classificados como do tipo livre em escala de bacia (Celligoi, 2000), deve envolver fatores técnico-científicos (geológicos, geofísicos, hidroquímicos) e sócio-econômicos que permitam definir os locais

mais propícios para a extração de água subterrânea e, ao mesmo tempo, possibilitem um gerenciamento que compatibilize a produção de água com a preservação dos aquíferos. Desta maneira, o conhecimento dos controles geológicos locais na dinâmica hidrogeológica dos aquíferos (quantificação volumétrica da vazão, capacidade específica, variações hidroquímicas), e da sua compartimentação morfoestrutural, devem possibilitar o desenvolvimento de modelos conceituais, os quais constituem ferramentas importantes para o gerenciamento da exploração. Deste modo postula-se que futuros modelos regionais para as locações, projetos de poços e captação de água subterrânea na região devam ser precedidos pela avaliação de áreas onde os problemas de captação e gerenciamento sejam devidamente equacionados, a partir de uma investigação hidrogeológica detalhada, apoiada pela geologia e pela geofísica. Essa investigação deve envolver o zoneamento hidroquímico, a análise estrutural e a interpretação de dados geofísicos, de modo a evitar resultados indesejáveis, como vazões inferiores às esperadas, alta salinidade da água ou mesmo colocar em risco o manancial, através da superexploração, causando perda de investimentos ou comprometendo a qualidade dos sistemas aquíferos envolvidos.

Com base nos bancos de dados da Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar) e da Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (Suderhsa), foram identificados na área de estudo 222 poços completados no Sistema Aquífero Caiuá, contendo informações consistentes relativas a seus testes de bombeamento. Nestes poços foram avaliados a vazão, a capacidade específica, os sólidos totais dissolvidos e o potencial hidrogeniônico (pH), todos eles mostrando ampla gama de valores por toda a área. O mesmo acontece quando se avaliam as variáveis hidroquímicas, obtidas em 46 poços por Celligoi (2000). Rosa Filho (1982), avaliando as causas do declínio gradativo da produtividade dos poços da região, através dos registros dos testes de bombeamento, identificou incompatibilidades entre estes e os perfis construtivos, sugerindo assim alterações no regime de bombeamento como forma de estabilização da produção dos poços. Em sua análise, realizada em 29 poços, foram identificados diversos intervalos de diminuição granulométrica, atuando

localmente como aquíferos. Tais intervalos, em escala local, certamente influenciam as vazões dos poços, bem como a distribuição das demais variáveis (vazão, capacidade específica, STD, pH, hidroquímica), porém, regionalmente, não devem se apresentar muito influentes, uma vez que a continuidade lateral de tais intervalos não é muito expressiva.

Para a geração de um modelo do arcabouço estrutural de superfície dos arenitos do Grupo Caiuá foram analisadas, através do traçado de alinhamentos estruturais, as imagens do satélite Landsat 7, sensor ETM+ (*pixel* de 30 metros), o modelo numérico do terreno (MNT), proveniente do sensor SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) da Nasa (*National Aeronautics and Space Administration*, dos Estados Unidos), com *pixel* de 90 metros, além da interpretação morfoestrutural da rede de drenagem, complementada com base no MNT. Os dados digitais referentes ao MNT foram obtidos diretamente da internet, no *site* oficial do projeto SRTM (<http://seamless.usgs.gov>).

Regionalmente ocorre na área uma anomalia radial da rede de drenagem, alcançando mais de 80 km de diâmetro, abrangendo quase a totalidade da sua porção centro-sul. Tal feição já foi objeto de estudo por Couto e Silva (1980). Associada a esta anomalia de drenagem foi identificada uma feição dômica do relevo, denominada informalmente de Domo de Umuarama, com centro próximo à cidade homônima, através de estudos geofísicos preliminares desenvolvidos por Ferreira *et al.* (1999), a partir do processamento de dados aeromagnetométricos pertencentes ao Projeto Aerogeofísico Rio Ivaí (Petrobras, 1980), mostrando a presença de grandes estruturas do embasamento do Grupo Caiuá, geográfica e morfologicamente compatíveis aos limites da anomalia da rede de drenagem. Foram identificadas também diversas outras anomalias dômicas semelhantes à principal, porém com menor dimensões.

Através do processamento dos dados magnéticos foi elaborado o modelo do arcabouço estrutural do embasamento da Bacia Bauru (Formação Serra Geral), na região estudada. A aplicação da magnetometria visando tal objetivo, somente foi possível devido à composição psamítica do Grupo Caiuá, em contraste com seu embasamento, fortemente magnético (basaltos).

As informações obtidas nas diversas análises foram integradas em um único mapa de alinhamentos estruturais, exibindo as grandes estruturas comuns à bacia sedimentar e ao seu embasamento, o qual foi comparado com a distribuição espacial das variáveis hidrogeológicas/hidroquímicas, visando identificar relações entre estas variáveis e o arcabouço estrutural da região.

## 2 Objetivos

Visando compreender a variabilidade espacial dos dados hidrogeológicos/hidroquímicos, o estudo pretendeu testar a influência de possíveis controles estruturais na hidroquímica e na hidrodinâmica do Sistema Aquífero Caiuá, através da interpretação estrutural tanto dos sedimentos pertencentes ao Grupo Caiuá como dos basaltos do seu embasamento. O desenvolvimento de um modelo do arcabouço estrutural somente se tornou possível através do reconhecimento das estruturas geológicas comuns aos dois níveis de investigação, permitindo assim compreender a relação entre elas nos dois conjuntos litológicos.

Como método de comparação foram gerados mapas das diversas variáveis hidrogeológicas (superfície potenciométrica, vazão, capacidade específica, pH, sólidos totais dissolvidos e do conteúdo de catiônico das águas subterrâneas), interpolados pelo método da curvatura mínima (Briggs, 1974). Estes mapas foram sobrepostos ao arcabouço estrutural da Bacia Bauru e às curvas de isópacas dos arenitos do Grupo Caiuá, na tentativa de identificar relações entre as estruturas geológicas e a distribuição espacial das variáveis hidrogeológicas.

Com o propósito de criar um modelo do arcabouço estrutural do embasamento do Grupo Caiuá, foram analisados os dados aeromagnetométricos provenientes do Projeto Aerogeofísico Rio Ivaí (Petrobras, 1980) e, através da utilização de diversas técnicas de processamento, foram traçadas as principais feições estruturais.

Com a posse dos mapas destas feições nos dois níveis de investigação, foi possível, através de comparação por sobreposição, gerar um modelo comum integrado, exibindo as grandes estruturas da região.

Visando relacionar o arcabouço estrutural dos sistemas aquíferos com o comportamento das variáveis hidrogeológicas foram então criados quatro mapas, (vazão, capacidade específica, sólidos totais dissolvidos e pH) além de um quinto, referente à regionalização dos diagramas ternários modificados de Piper. A comparação entre as variáveis hidroquímicas e o arcabouço estrutural

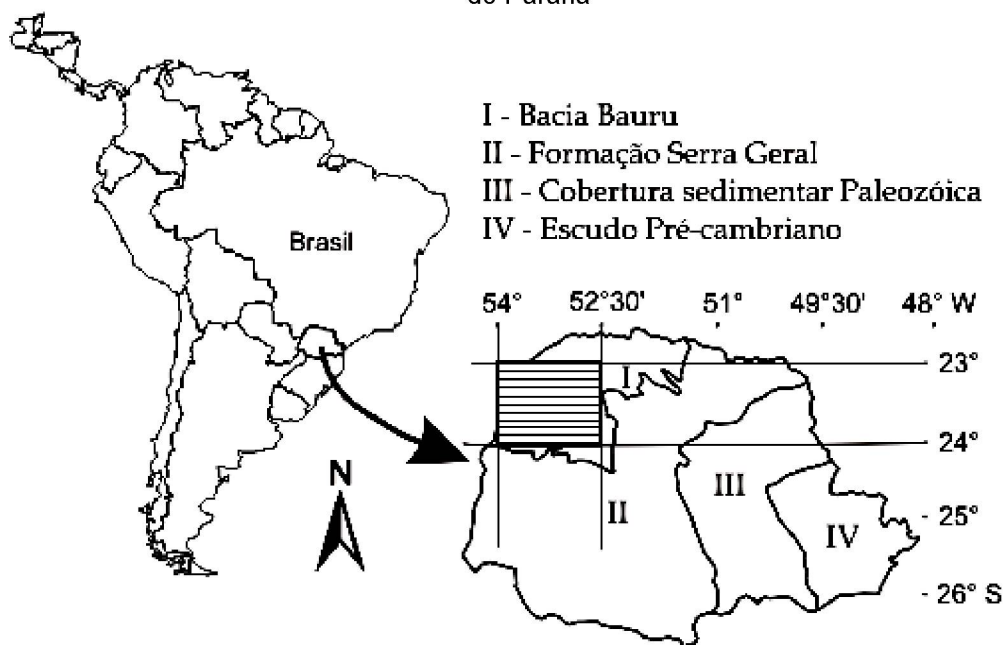


permitiu a caracterização de zonas de conectividade hidráulica entre os dois sistemas aquíferos.

### 3 Localização da área de estudo

A área de estudo está localizada no noroeste do estado do Paraná, região sul do Brasil, entre as coordenadas 23°00' e 24°00' de latitude sul e 52°30' e 54°00' de longitude oeste, totalizando cerca de 16.720 km<sup>2</sup>, como mostra a Figura 1. O rio Paraná foi utilizado como limite noroeste da área, no sentido de contemplar os bancos de dados hidrogeológicos paranaenses. As principais cidades da área são Cianorte e Umuarama, e o acesso a elas é fácil, podendo ser feito por várias estradas asfaltadas que cortam a região.

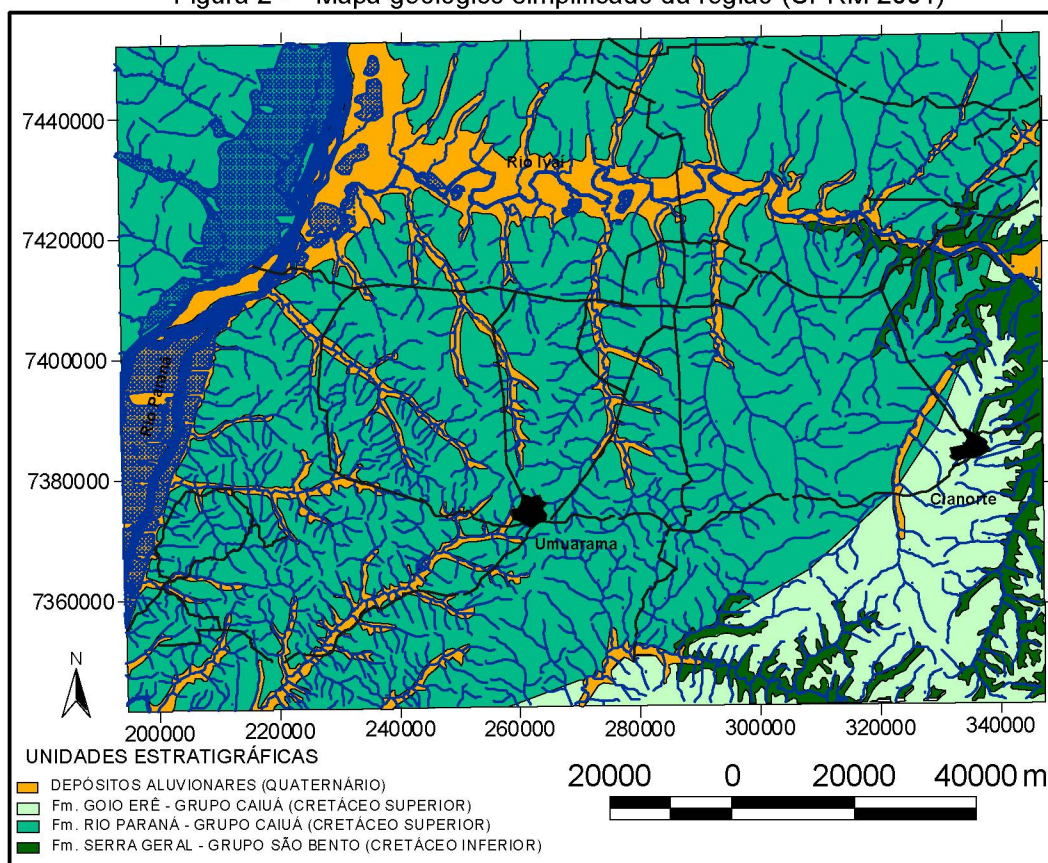
Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo e compartimentos geológicos do estado do Paraná



## 4 Caracterização geológica

Afloram na região rochas pertencentes a duas unidades estratigráficas distintas: arenitos da Bacia Bauru (Grupo Caiuá, Fernandes e Coimbra, 1996), depositados sobre os basaltos da Formação Serra Geral (Grupo São Bento, Bacia do Paraná). O mapa geológico simplificado da região é mostrado na Figura 2, onde se ressaltam os sedimentos aluvionares dos principais rios da região, entre eles o Paraná, com direção NNE-SSW, na porção noroeste da área, e o Ivaí, a norte, com direção ENE-WSW.

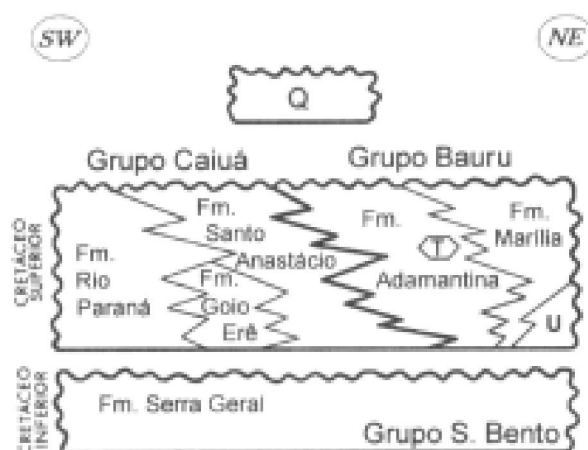
Figura 2 - Mapa geológico simplificado da região (CPRM 2001)



A conceituação da Bacia Bauru (Fernandes e Coimbra, 1996), composta pelos grupos Caiuá e Bauru adotada no presente estudo (Figura 3), foi recentemente incorporada ao Mapa Geológico do Brasil (CPRM, 2001). A separação da Bacia Bauru do contexto da Bacia do Paraná foi devida ao fato da deposição dos sedimentos da Bacia Bauru ter ocorrido após a ruptura do

continente Gondwana, durante o Cretáceo Superior (Fernandes e Coimbra, 1996).

Figura 3 - Coluna litoestratigráficas da Bacia Bauru. Convenções U. Fm Uberaba; T. Analcimitos Taiúva; Q. Sedimentos aluviais quaternários (Fernandes e Coimbra 1996)



Os basaltos da Formação Serra Geral (embasamento da Bacia Bauru) marcam a quebra do megacontinente Gondwana, desde seus estágios iniciais até a completa separação entre a África e a América do Sul, abrangendo um intervalo de 115 a 135 Ma (Amaral *et al.*, 1966 *apud* Milani *et al.*, 1998). O resultado deste evento é a presença de mais de 2000 metros de espessura de rochas basálticas, sobrepostos às rochas sedimentares da Bacia do Paraná, além de uma trama complexa de diques e soleiras alojados nos sedimentos.

A Bacia do Paraná é uma bacia intracratônica, formada por intercalações policíclicas de sedimentação e erosão durante o Paleozóico-Mesozóico. Zalán *et al.* (1987) divide-a em 5 seqüências deposicionais: Siluriana, Devoniana, Permo-Carbonífera, Triássica e Juro-Cretácea, enquanto Soares (1991) designa as seqüências Ordovício-Siluriana, Devoniano-Mississippiana, Pensilvaniano-Permiana, Triássico-Jurássica e Cretácea.

Para Milani *et al.* (1998) podem ser identificadas seis superseqüências: Rio Ivaí (Ordoviciano-Siluriano), Paraná (Devoniano), Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico), Gondwana II (Meso a Neotriássico), Gondwana III (Neojurássico-Eocretáceo) e Bauru (Neocretáceo), esta última corresponderia à seqüência depositada na Bacia Bauru de Fernandes e Coimbra (1996). As três

primeiras unidades representam grandes ciclos transgressivos paleozóicos, enquanto as demais se referem a sedimentação continental e rochas ígneas associadas. O embasamento da Bacia do Paraná é formado por terrenos pré-cambrianos, de composição diversificada, aglutinados a crátons arqueanos durante a orogenia Brasiliana/Pan-Africana (Almeida e Hasui, 1983). O arcabouço estrutural gerado pelas colagens destes terrenos teve intensa influência na evolução da Bacia do Paraná, durante o Fanerozóico.

Ferreira (1982a,b) identificou os principais alinhamentos estruturais-magnéticos integrantes do Arco de Ponta Grossa, denominando-os de Guapiara (limite setentrional), São Jerônimo-Curiúva e Rio Alonzo (região central) e Rio Piquiri (limite meridional).

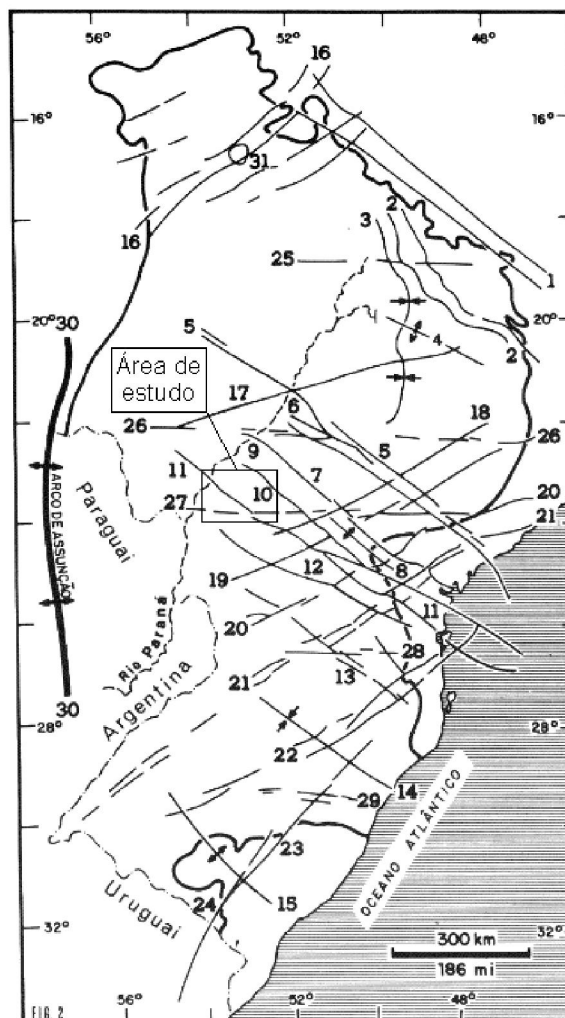
Zalán *et al.* (1987) apresentaram um mapa do arcabouço Bacia do Paraná (Figura 4), indicando as mais importantes estruturas. Dentre elas destacam-se, com direção NW-SE, a falha do Rio Alonzo e a zona de falha Cândido de Abreu-Campo Mourão, e com direção E-W, o lineamento de São Sebastião, todas identificadas na área de estudo.

Soares *et al.* (1991) identificaram cinco direções predominantes na estruturação da Bacia do Paraná: Paraná (N25E), Pitanga (N60E), Rio Ivaí (N45W), Rio Piquiri (N70W), Goioxim (N5-20W), além de duas outras direções, menos proeminentes: Tapirapui (N-S) e Paranapanema (E-W). As direções mais importantes (NW-SE e NE-SW) constituem falhas simples ou extensas zonas de falha, com dezenas de quilômetros de largura e centenas de quilômetros de comprimento. Essas estruturas foram submetidas a diversas fases de esforços tectônicos que resultaram em vários ciclos de deformação da bacia, com rotação do elipsóide de deformação, decorrente de acomodações do arcabouço estrutural frente às novas condições tectônicas.

Próximo a área de estudo a principal estrutura de escala regional é o Arco de Ponta Grossa (Ferreira, 1982a,b), localizado a nordeste da área e de direção NW-SE, representando uma feição de soerguimento atuante principalmente durante o Jurássico e o Cretáceo Inferior (Almeida, 1986), associada aos enxames de diques do Mesozóico e ao extravasamento dos basaltos da Formação Serra Geral. Dentre os quatro alinhamentos estruturais-magnéticos de direção NW-SE do Arco de Ponta Grossa, identificados por

Ferreira (1982a,b), apenas o Alinhamento do Rio Alonzo afeta a área de estudo, no extremo nordeste.

Figura 4 - Mapa do arcabouço estrutural da Bacia do Paraná (Zalán *et al.* 1987), indicando a área de estudo.



#### Legenda:

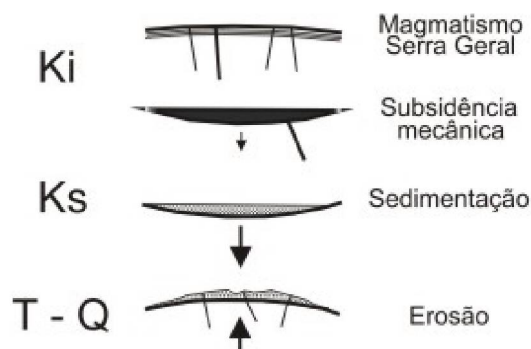
1- Arco do Alto Parnaíba; 2- Flexura de Goiânia; 3- Baixo de Ipiacú/Campina Verde; 4- Alto de Cardoso; 5- Z. F. de Guapiara; 6- Falha de Santo Anastácio; 7- Falha de São Jerônimo – Curiúva; 8- Arco de Ponta Grossa; 9- Z. F. de Curitiba-Maringá; 10- Falha do Rio Alonzo; 11- Z. F. Cândido de Abreu-Campo Mourão; 12- Z. F. Lin. do Rio Piquiri; 13- Z. F. Caçador; 14- Sinclinal de Torres; 15- Arco do Rio Grande; 16- Lin. Transbrasiliano; 17- Lin. de Araçatuba; 18- Falha de Guaxupé; 19- Falha da Jacutinga; 20- Z. F. Taxaquara; 21- Z. F. da Lancinha; 22- Z. F. de Blumenau-Soledade; 23- Falha do Leão; 24- Falha de Açotea; 25- Lin. Cassilândia; 26- Lin. Mogi-Guaçu-Dourados; 27- Lin. de São Sebastião; 28- Lin. de Taquara Verde; 29- Lin. Bento Gonçalves; 30- Arco de Assunção; 31- Domo de Araguainha.

Para Fernandes e Coimbra (1996) o vulcanismo gerador da Formação Serra Geral marcou o final da sedimentação na Bacia do Paraná, durante o Cretáceo Inferior. Em decorrência da subsidência mecânica causada pelo peso das rochas basálticas, já com os continentes africano e sul-americano apartados, criou-se uma depressão no centro-sul da Plataforma Sul-americana,



rapidamente preenchida pelos sedimentos provenientes das bordas alçadas, denominada Bacia Bauru, no Cretáceo Superior, conforme o modelo mostrado na Figura 5.

Figura 5 - Modelo evolutivo da Bacia Bauru (Fernandes e Coimbra 1996)

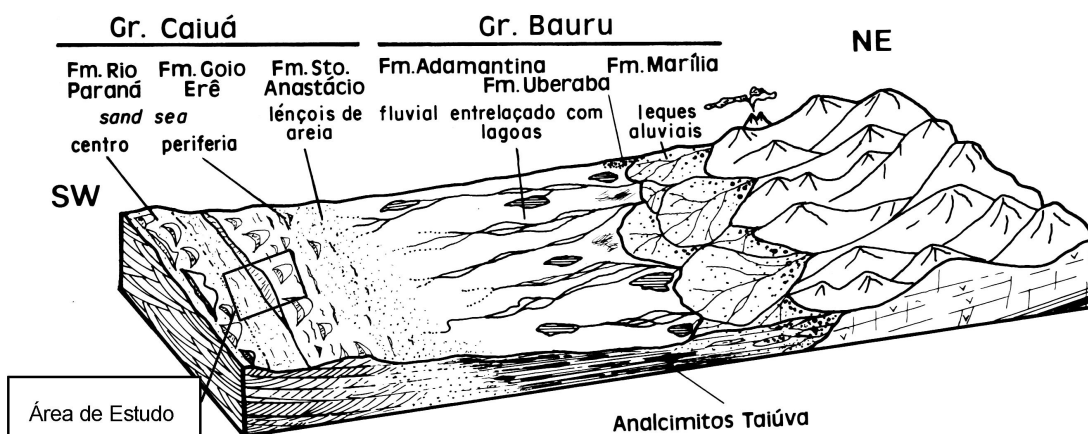


A Bacia Bauru, na área de estudo, compreende as formações Goio-Erê e Rio Paraná, do Grupo Caiuá (Fernandes e Coimbra, 1996), lateralmente interdigitadas (Figura 3), correspondendo, respectivamente, à periferia e ao centro do *sand sea*, ambiente desértico ao qual é atribuído sua deposição. A distribuição dos sistemas deposicionais, interpretada pelos referidos autores no interior da Bacia Bauru, exibida na Figura 6, indica, na porção interior do chamado deserto Caiuá, as duas unidades estratigráficas aflorantes na área de estudo (Formações Goio Erê e Rio Paraná).

Os arenitos pertencentes a estas unidades são muito bem selecionados, decorrente da deposição em ambiente desértico, que confere as rochas alta porosidade primária. Variam de arenitos finos a muito finos, basicamente quartzosos, embora a presença do microclínio seja comum. A dissolução dos feldspatos resulta em um aumento de 5 a 10% na porosidade total da rocha, através da alteração de grãos de minerais mais instáveis. Normalmente os arenitos são bastante friáveis, favorecendo a ocorrência de voçorocas quando a cobertura vegetal é removida. Localmente, a porosidade diminui por conta de variações granulométricas e cimentação, esta última mais expressiva na porção basal dos sedimentos, próximo ao contato com os basaltos, onde se desenvolve cimentação carbonática. As principais estruturas primárias são estratificações cruzadas de médio a grande porte na Formação Rio Paraná e de médio a pequeno porte, além de estratos tabulares e maciços, na Formação Goio-Erê. Para a primeira, a espessura da unidade em toda a bacia não

ultrapassa 277 m enquanto a última possui no máximo 50 m (Fernandes, 1992).

Figura 6 - Reconstrução paleogeográfica da Bacia Bauru (Fernandes, 1992), mostrando a localização aproximada da área de estudo



Gasparetto (1999), comparando o material constituinte das formações superficiais do noroeste do Paraná com os arenitos do Grupo Caiuá, postulou que as primeiras são derivadas dos arenitos, geradas por alteração *in situ*. Tal afirmação decorre da semelhança entre a distribuição das frações arenosas grossas, bem como da superfície granular, entre os perfis de solo e os arenitos do Grupo Caiuá, ambos formados pelas frações areia fina a muito fina, moderadas a bem selecionadas. Análises qualitativas da fração fina mostraram também a mesma composição química para a matriz do arenito e o plasma das formações superficiais, sendo constituídos basicamente por caulinita e hidróxidos de ferro.

As duas unidades da área constituem importantes sistemas aquíferos em toda a extensão das bacias, sendo amplamente utilizados tanto para abastecimento público como privado. Apesar de possuir diferenças no tipo de porosidade, granular nos arenitos e fissural nos basaltos, em escala regional, tanto o Sistema Aquífero Caiuá como a porção superior do Sistema Aquífero Serra Geral são classificados como do tipo livre a semiconfinado, porém com relações muito íntimas próximo ao contato entre ambas (Celligoi, 2000). Localmente, no interior dos arenitos, em decorrência das variações na

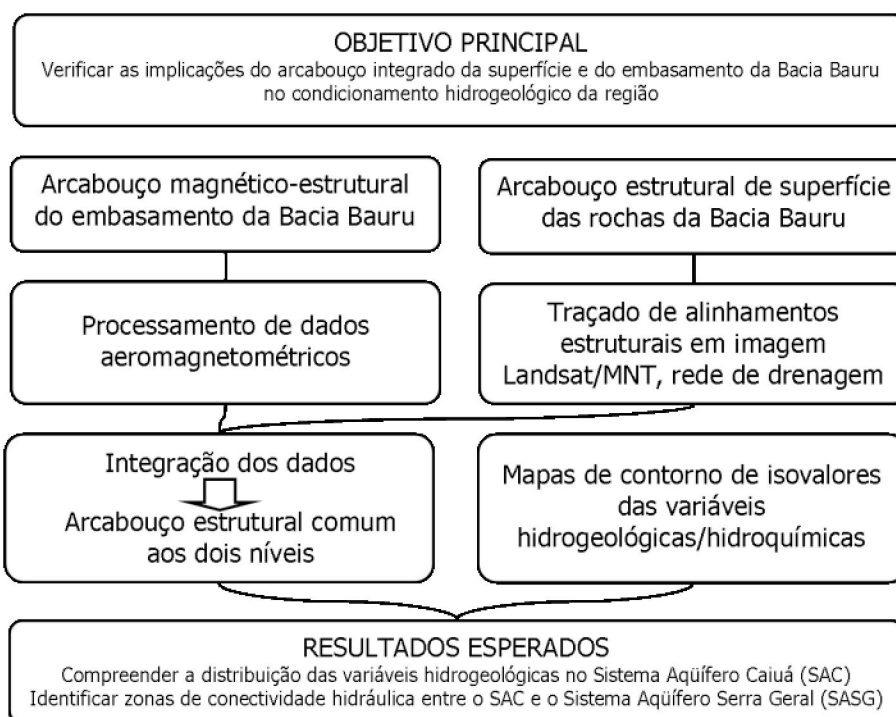


porosidade, são caracterizados pequenos aquíferos, responsáveis pelo semiconfinamento das águas (Rosa Filho, 1982).

## 5 Materiais e métodos

A elaboração de um arcabouço estrutural da área de estudo tornou-se possível através da integração de diversos mapas temáticos, derivados de variadas fontes de informação, conforme mostra o fluxograma exibido na Figura 7, descrevendo sucintamente as atividades desenvolvidas.

Figura 7 - Fluxograma mostrando a seqüência resumida das atividades desenvolvidas



Para a geração de um modelo estrutural da superfície dos sedimentos do Grupo Caiuá foram utilizadas três fontes principais de dados: modelo numérico de terreno (MNT), imagens do satélite Landsat 7 e rede de drenagem. Esta análise integrada partiu dos traçados estruturais de cada um dos temas, os quais foram posteriormente agrupados em um único mapa, representando as estruturas aflorantes da cobertura sedimentar.

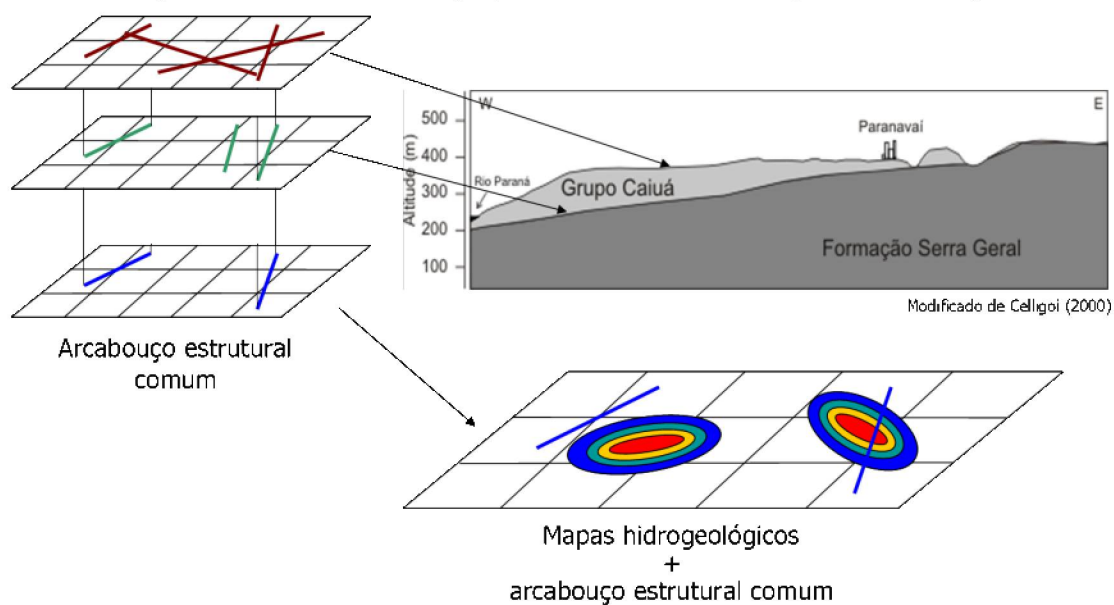
Desta forma, através do processamento de dados aeromagnéticos, foi gerado um mapa de alinhamentos estruturais do embasamento da Bacia Bauru no noroeste do estado do Paraná.

O cruzamento das informações obtidas nos vários níveis de observação resultou em um mapa das principais estruturas comuns aos dois ambientes geológicos, o qual foi cotejado com a distribuição espacial dos dados

hidrogeológicos (superfície potenciométrica, vazão, capacidade específica, pH, sólidos totais dissolvidos) e hidroquímicos. A penetratividade das estruturas e suas profundidades foram estimadas através da análise do espectro de potência radial do campo magnético residual e da Deconvolução de Euler (*Copyright 2002<sup>®</sup>, Geosoft Inc.*).

A Figura 8 exemplifica como foram realizadas as integrações entre os diversos mapas temáticos gerados.

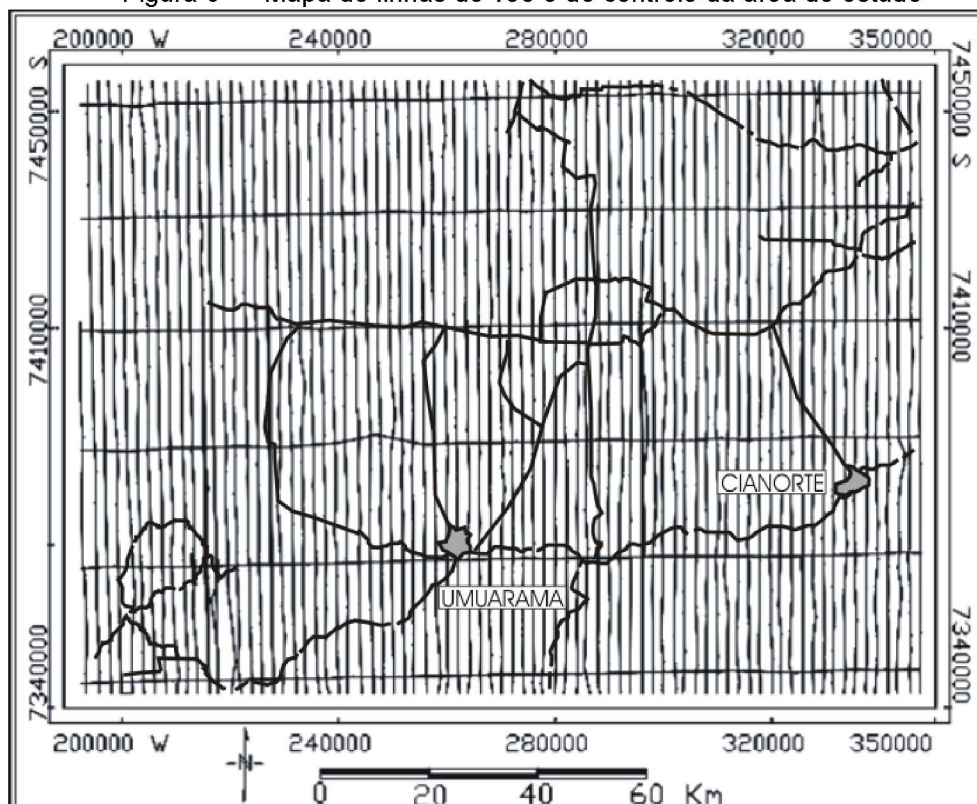
Figura 8 - Modelo de integração entre os diversos mapas temáticos gerados



## 6 Análise estrutural de sub-superfície

A análise e a interpretação estrutural sub-superficial da Bacia Bauru foram centradas no processamento dos dados aeromagnetométricos disponíveis, provenientes do Projeto Aerogeofísico Rio Ivaí (Petrobrás, 1980). Os dados foram adquiridos a uma altura média de 450 metros, segundo a direção N-S, intervalo de amostragem de 56 metros, linhas de vôo separadas de 2000 metros e de controle espaçadas de 20000 metros, cuja disposição pode ser vista na Figura 9.

Figura 9 - Mapa de linhas de vôo e de controle da área de estudo



A aplicação da magnetometria na identificação de estruturas do embasamento da Bacia Bauru, somente foi possível porque os basaltos, fortemente magnéticos, estão cobertos por arenitos não magnéticos.

A presença de crostas de óxidos de ferro na superfície dos arenitos pode localmente interferir no campo magnético terrestre, porém, devido à escala do estudo, com disposição e altitude das linhas de vôo projetadas para estudos regionais, a possível contribuição destas fontes para o sinal total foi

minimizada. Outro artifício utilizado para reduzir a interferência de fontes superficiais (rasas), foi a aplicação de filtros de continuação ascendente (*upward continuation*).

Os dados originais foram subtraídos do campo principal da Terra (*International Geomagnetic Reference Field – IGRF*), para o período do levantamento, resultando no denominado mapa magnético residual, sobre o qual foram realizadas as diversas etapas de processamento.

## **6.1. Pré-processamento**

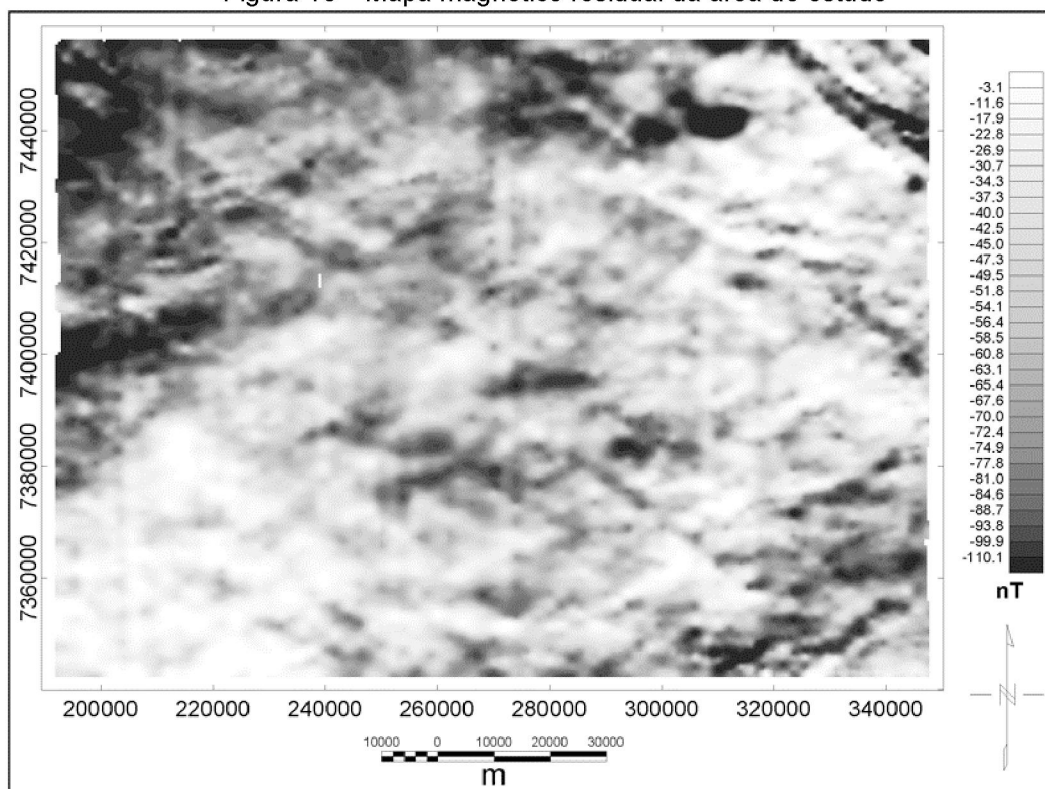
### **6.1.1. Geração de malha regular**

Os dados magnéticos residuais (já subtraídos do *IGRF*), foram processados a partir do formato digital xyz (em formato ASC II), o qual organiza as informações hierarquicamente, primeiro por linha de vôo, depois por ponto de medição (1 medida para cada 56 metros). A partir deste formato os valores foram interpolados através do método da curvatura mínima (Briggs, 1974), para a geração de uma malha regular, com  $\frac{1}{4}$  do espaçamento nominal entre as linhas de vôo, ou seja, células de 500 x 500 metros, resultando no mapa magnético residual da Figura 10, sombreado na direção NE-SW.

### **6.1.2. Micronivelamento**

Uma série de erros de nivelamento, decorrentes da aquisição dos dados, são representados no mapa magnético residual. Estes erros se refletem nas imagens geofísicas como ruídos paralelos às linhas de vôo, representadas por artefatos de alta frequência, os quais podem ser amplificados na continuidade do processamento, dificultando a interpretação e originando falsas anomalias. Desta forma os dados residuais, já regularizados na forma de malha quadrada, foram micronivelados antes das demais etapas de processamento. O mapa magnético residual foi submetido a dois procedimentos de micronivelamento, com o objetivo de comparar estatisticamente os dois métodos, para em seguida selecionar o melhor deles e dar continuidade ao processamento.

Figura 10 - Mapa magnético residual da área de estudo



Os dois procedimentos utilizados, denominados de gridagem bidirecional e decorrução FFT (*Fast Fourier Transform*), são disponibilizados no aplicativo computacional *Oasis Montaj 5.1.4*. (Copyright 2001<sup>®</sup>, Geosoft Inc.).

O primeiro método (gridagem bidirecional) assume que o campo total (*grid* de entrada) é produto da geologia, do campo regional e dos erros de nivelamento e utiliza uma sequência de filtragens do tipo passa-baixa, para eliminar os ruídos de alta frequência espacial (Geosoft, 2001). O mapa magnético resultante deste procedimento de micronivelamento é exibido na Figura 11, sombreado na direção NE-SW.

O micronivelamento pela Decorrução FFT, baseado no algoritmo proposto por Minty (1991), aplica um filtro passa-alta (*butterworth*) ajustado para quatro vezes a separação entre as linhas de vôo. Isto é feito para passar comprimentos de onda da ordem de duas a quatro vezes o espaçamento entre as linhas de vôo, como aquelas que resultariam nos erros de nivelamento. Um filtro do tipo coseno direcional é então ajustado para passar comprimentos de onda somente na direção das linhas. O resultado do micronivelamento

realizado por este procedimento é mostrado na Figura 12, sombreado na direção NE-SW.

Figura 11 - Mapa magnético residual micronivelado por gridagem bidirecional

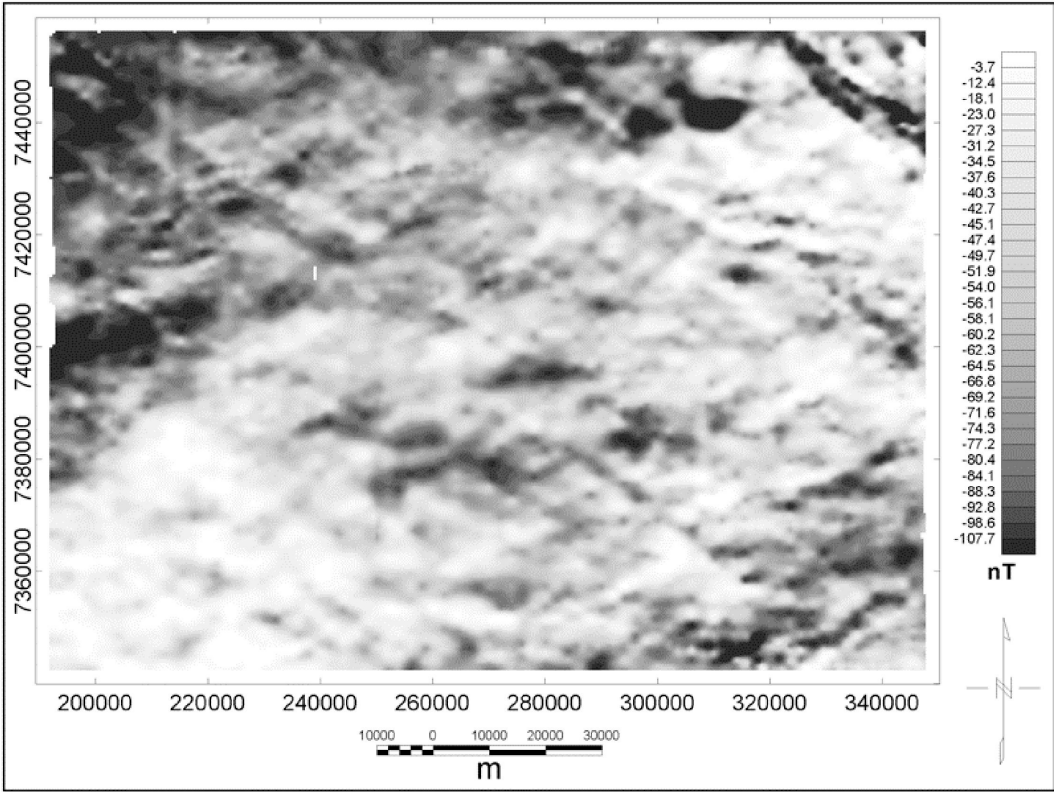
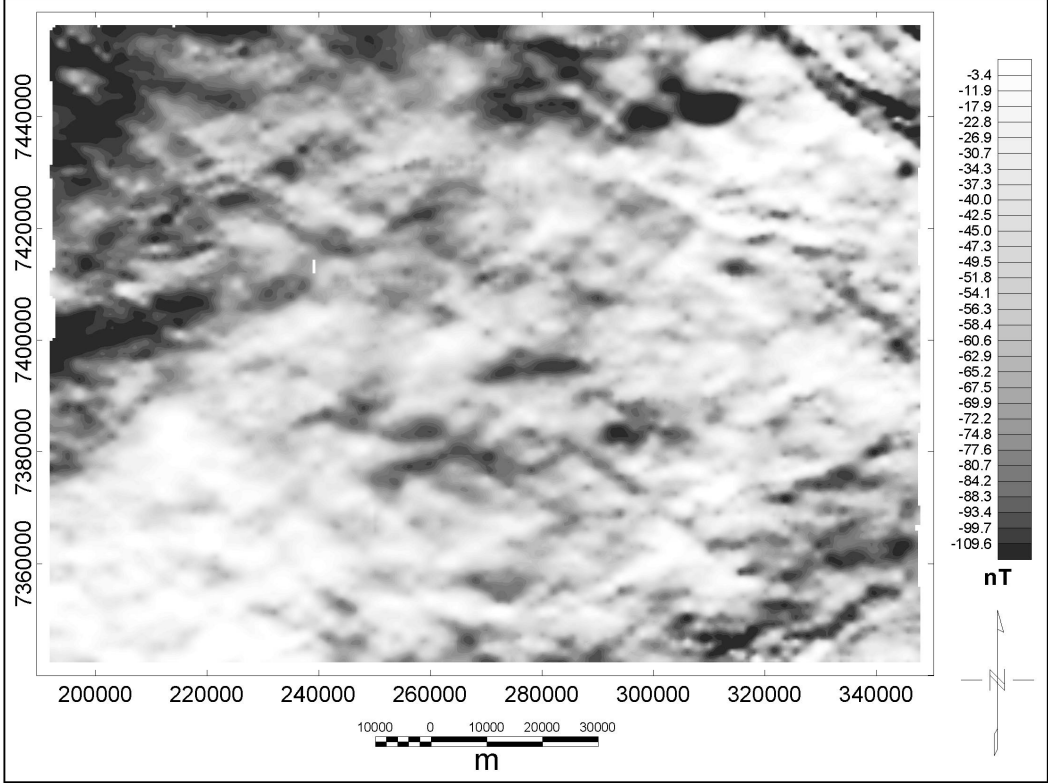


Figura 12 - Mapa magnético residual micronivelado por decorrução FFT



As duas malhas microniveladas foram cotejadas visualmente, através das figuras anteriores, e estatisticamente, por meio da comparação de seus valores máximos, mínimos, médias e desvios padrão, para então proceder a escolha adequada. A Tabela 1 mostra a comparação estatística destes parâmetros. Desta forma foi selecionado o método da decorrugação FFT (Figura 12), tanto visual como estatisticamente, sendo esta malha utilizada nas demais etapas do processamento.

**Tabela 1 -** Comparação entre os valores da malha original do campo magnético residual e os resultantes dos procedimentos de micronivelamento

	VALOR MÍNIMO	VALOR MÁXIMO	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
<b>MALHA ORIGINAL</b>	- 218,2	79,6	- 56,2	28,8
<b>GRIDAGEM BIDIRECIONAL</b>	- 225,8	89,5	- 55,9	28,1
<b>DECORRUGAÇÃO FFT</b>	- 217,7	80,5	- 56,1	28,6

## **6.2. Processamento**

### **6.2.1. Espectro de potência radial**

A partir da malha micronivelada foi gerado o espectro de potência radial, que expressa a energia relativa ao número de onda e a sua direção, através de uma função bidimensional. O resultado do cálculo do espectro radial, realizado pela técnica da Geosoft (2001), mostra um gráfico com o número de onda no eixo x e o logaritmo do espectro de potência no eixo y.

A profundidade estimada para um determinado número de onda pode ser calculada através da relação abaixo:

$$\text{Log } E(r) = 4\pi hr,$$

onde:  $E(r)$  = energia;  $h$  = profundidade estatística do topo das fontes;  $r = (u^2 + v^2)^{1/2}$ , sendo  $u$  e  $v$  os números de onda nas direções  $x$  e  $y$ , respectivamente.

A profundidade para um conjunto estatístico de fontes pode ser calculada pela seguinte expressão:



$$h = -s/4\pi,$$

onde **h** é a profundidade e **s** é a declividade do logaritmo do espectro de potência.

Para transformar o valor observado no espectro, para um determinado número de onda, em unidades do terreno, deve ser utilizada a relação abaixo:

$$\text{Unidades no terreno} = (1/w) * 1000,$$

onde **w** é o número de onda.

A Figura 13 exibe o espectro de potência radial da área de estudo, gerado a partir da malha micronivelada, onde podem ser observadas quatro partições, marcadas por mudanças no declive da função espectral, definidas como:

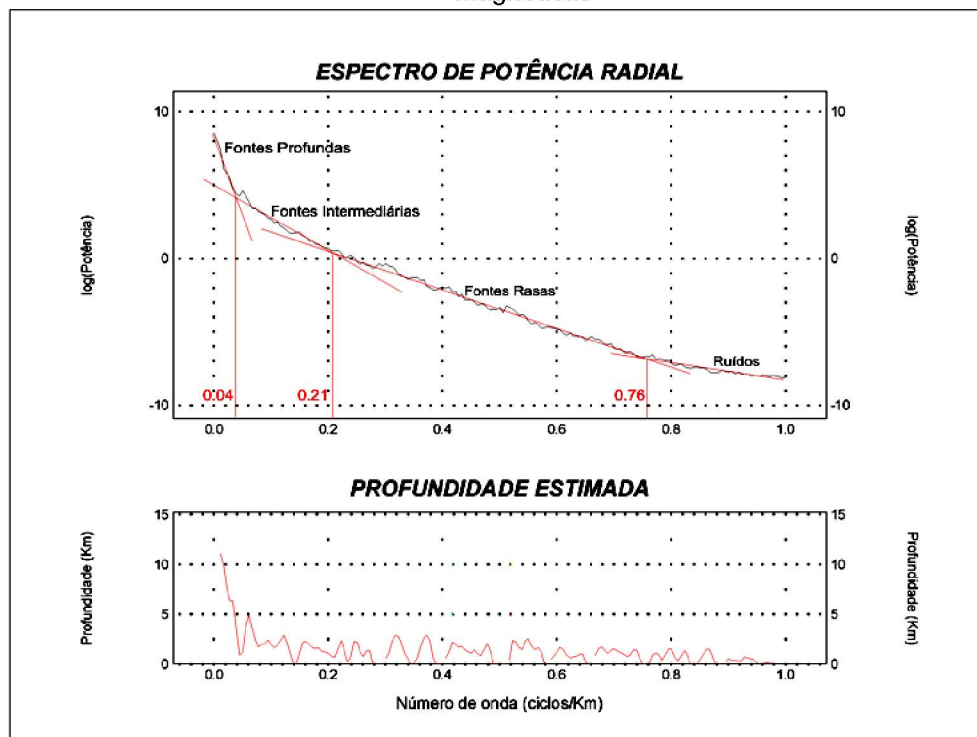
- Fontes profundas: referentes ao maior declive da função espectral, com comprimentos de onda maiores que 25 km e profundidades entre 3 e 11 km;
- Fontes intermediárias: identificadas entre os comprimentos de onda de 4,7 km e 25 km, com profundidades médias de 3,5 km;
- Fontes rasas: caracterizadas por comprimentos de onda entre 1,3 e 4,7 km e profundidades médias de 1,5 km; e
- Ruídos: marcados pela menor declividade da função espectral, com comprimentos de onda inferiores a 1,3 km e profundidades variadas, menores que 1,5 km.

### 6.2.2. Filtros passa-baixa e passa-banda

A aplicação dos filtros passa baixa (*low-pass*) e passa-banda (*band-pass*) é um artifício utilizado para fragmentar o campo potencial em frequências

espaciais específicas, pré-definidas a partir dos gradientes do espectro de potência radial. Como decorrência destes procedimentos, eventualmente, é introduzido, nos mapas fragmentados, o fenômeno de *Gibbs*, mostrando oscilações do espectro de amplitude de um filtro de frequência próximo à frequência de corte. Duas situações favorecem a ocorrência do fenômeno de *Gibbs*: (1) o gradiente do filtro se apresenta muito alto e/ou (2) a faixa de frequências é muito limitada.

Figura 13 - Espectro de potência radial da área estudada e profundidades estimadas das fontes magnéticas



A construção destes filtros é realizada no domínio da frequência, através da atribuição dos valores de magnitude 1 (passa) e zero (corta), para as bandas de frequência segundo as equações abaixo:

Filtro passa-baixa

$$L(k) = 1 \quad k \leq k_0$$

$$L(k) = 0 \quad k > k_0$$

Filtro passa-banda

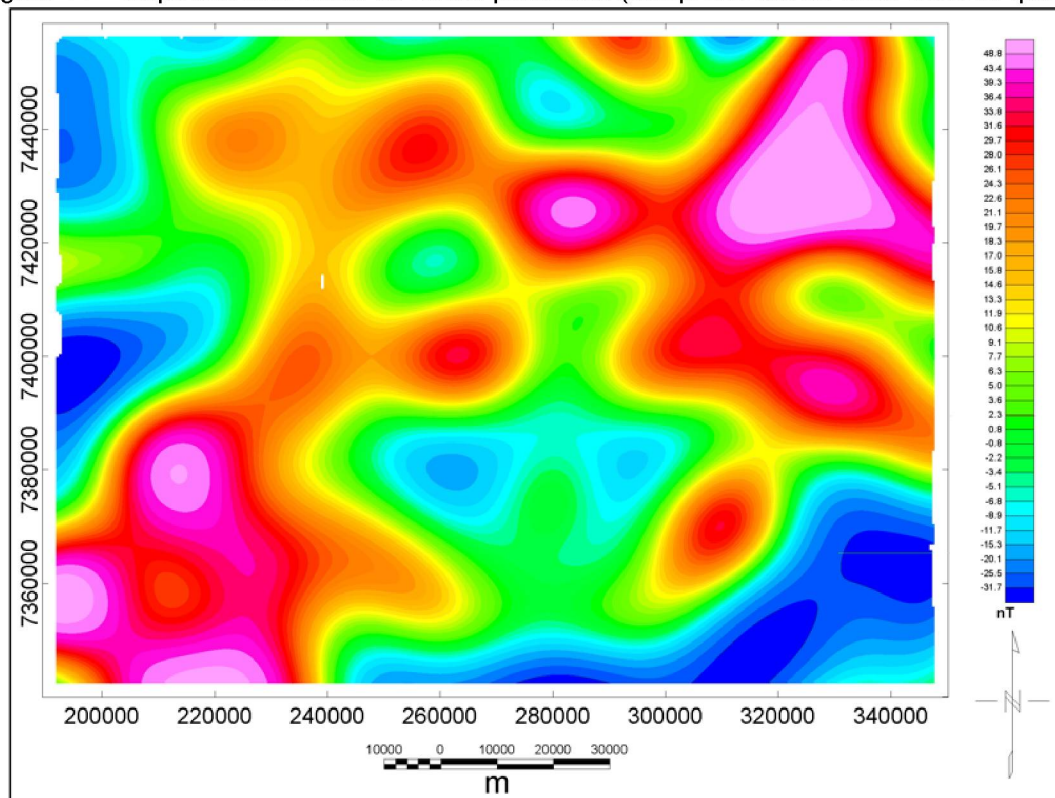
$$L(k) = 1 \quad k_0 \leq k \leq k_1$$

$$L(k) = 0 \quad k < k_0 \text{ e } k > k_1$$

onde  $k$  é o número de onda,  $k_0$  é o número de onda de corte das baixas frequências e  $k_1$  é o número de onda de corte das altas frequências.

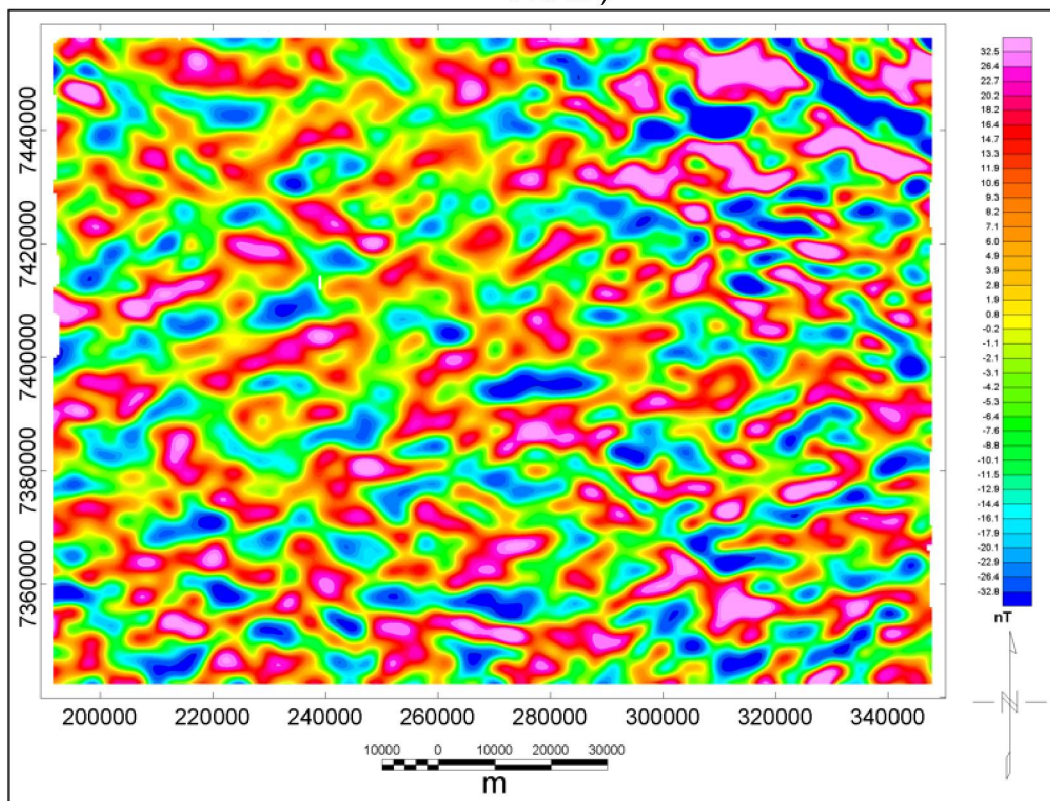
Inicialmente foi aplicado o filtro passa-baixa, construído com frequência passante para comprimentos de onda maiores que 25 km, ou seja, passando as frequências espaciais com número de onda menores que 0,04, isolando as fontes profundas a partir do campo magnético residual (Figura 14).

Figura 14 - Mapa das anomalias de fontes profundas (comprimentos de onda maiores que 25 km)



Com o objetivo de isolar as fontes intermediárias, cujos comprimentos de onda variam de 4,7 km a 25 km, foi construído um filtro passa-banda limitando a frequência de passagem, respectivamente, entre os números de onda de 0,04 e 0,21. O resultado da aplicação deste filtro é mostrado na Figura 15, exibindo as fontes anômalas intermediárias.

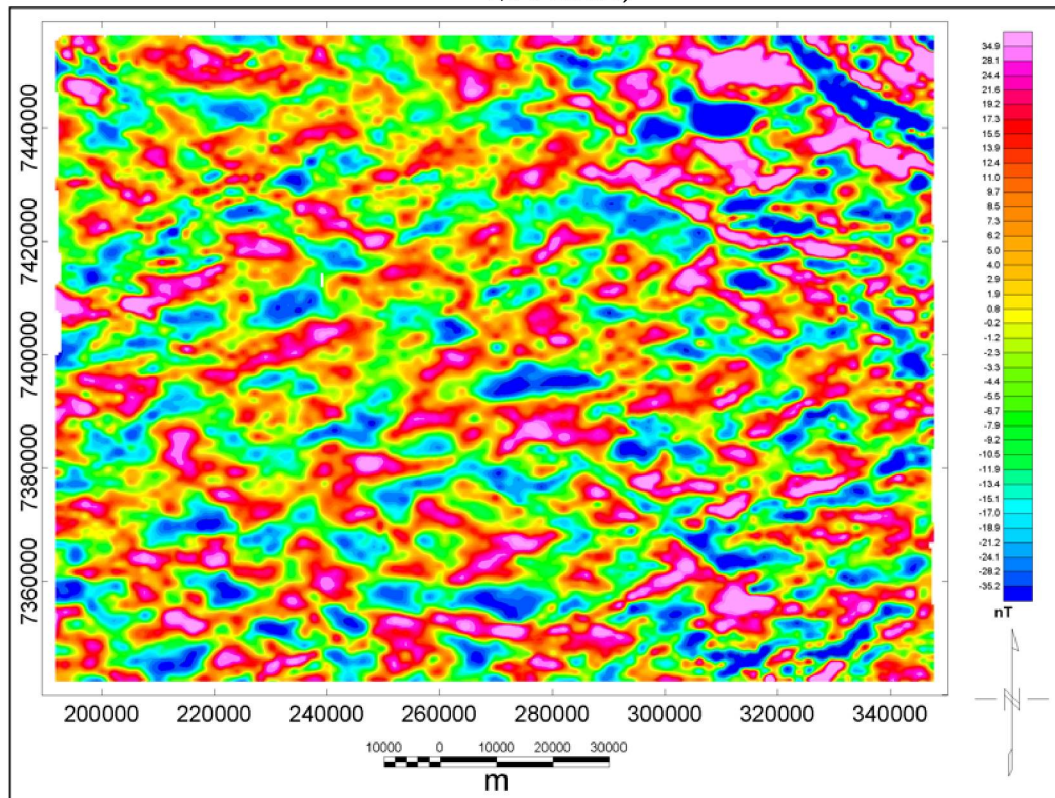
Figura 15 - Mapa das anomalias de fontes intermediárias (comprimentos de onda entre 4,7 e 25 km)



Uma vez que a utilização do filtro passa-banda, concebido para isolar as fontes rasas (delimitadas no espectro radial de potência – Figura 13), resultou na ocorrência do fenômeno de *Gibbs*, optou-se por utilizar o mesmo tipo de filtro, porém isolando do campo residual o somatório das anomalias intermediárias e rasas. Para isto o filtro foi construído utilizando comprimentos de onda entre 1,3 e 25 km, respectivamente representando números de onda entre 0,76 e 0,04. Desta forma, o mapa da Figura 16 exhibe as anomalias intermediárias (já mostradas na Figura 15) adicionado das anomalias rasas, estas evidenciadas por sinais de alta frequência espacial.



Figura 16 - Mapa das anomalias de fontes intermediárias e rasas (comprimentos de onda entre 1,3 e 25 km)



### 6.2.3. Continuações ascendentes

O procedimento de continuação ascendente simula a aquisição dos dados do campo magnético em níveis superiores ao original (mais afastados das fontes), removendo, ou pelo menos minimizando, os sinais de fontes rasas e ruídos.

Gunn (1975) propôs uma representação espectral geral para campos potenciais, cuja expressão é:

$$M_f(u,v,o) = 2\pi \cdot D_1(u,v) \cdot D_2(u,v) \cdot I(u,v) \cdot m_s(u,v,h) \cdot H(u,v,h)$$

onde:

$2\pi$  é um fator escalar,

$D_1$  é um fator para a direção da magnetização,

$D_2$  é um fator para a direção de medida,

$m_s$  é um equivalente ao fator de estrato (incorpora a forma dos corpos fonte de anomalias),

**I** é um fator de distinção entre campos magnéticos e gravimétricos e,

**H** =  $e^{-h(u^2 + v^2)^{1/2}}$  é um fator da profundidade.

O importante nesta equação é que, no domínio da frequência, a intensidade magnética é definida por simples multiplicações dos fatores relacionados à profundidade das fontes, formato dos corpos, direção da magnetização e latitude magnética. Por exemplo, a multiplicação do espectro de um campo por um fator  $H = e^{-h(u^2 + v^2)^{1/2}}$  transforma-o este em um espectro de um campo medido a uma distância **h** acima do plano de observação original. Através da transformada inversa de Fourier, os dados no domínio da frequência retornam ao domínio do espaço, possibilitando visualizar os resultados obtidos.

O mapa magnético residual foi submetido à continuações ascendentes, para simular os resultados decorrentes nas altitudes de 1000, 2000 e 3000 m, os quais são exibidos, respectivamente, nas Figuras 17, 18 e 19, onde observa-se a eliminação de grande parte dos sinais de alta frequência espacial do mapa residual original (450 m de altura), realçando as fontes anômalas profundas (maiores comprimentos de onda). Nota-se uma suavização crescente das anomalias, correspondentes aos incrementos da continuação ascendente, de modo que no mapa da Figura 19 (4000 m) somente as anomalias com maiores comprimentos de onda são representadas.

Figura 17 - Mapa magnético residual continuado para a altitude de 1000 m

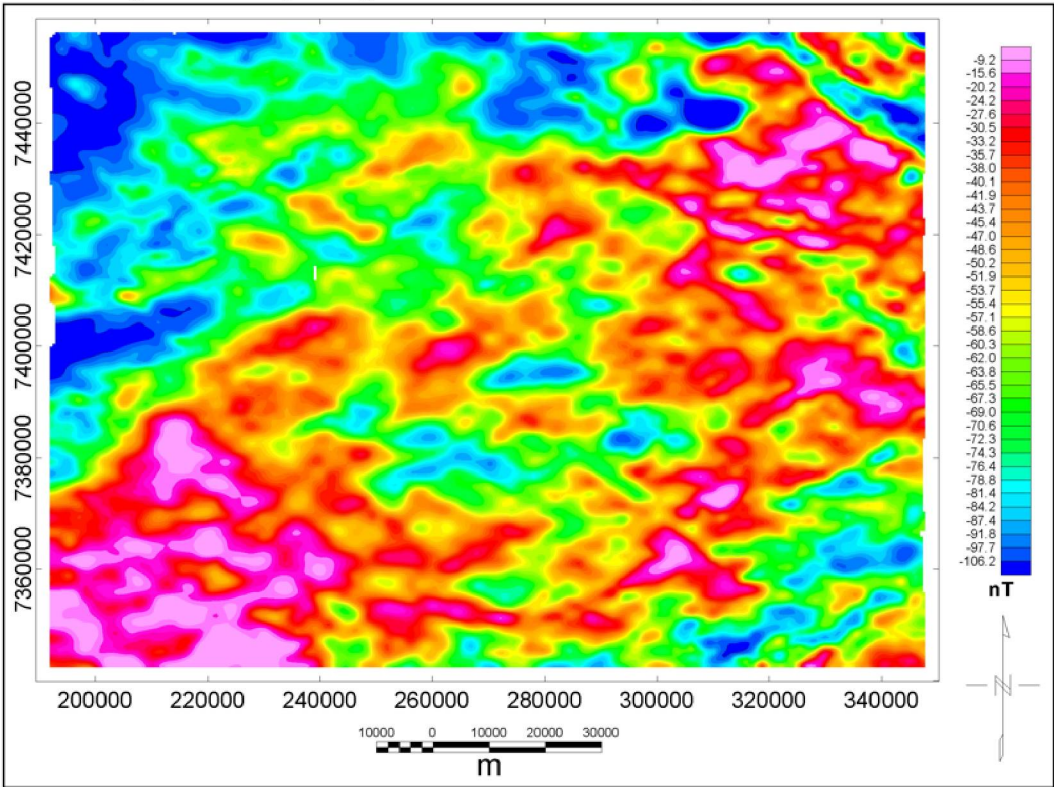


Figura 18 - Mapa magnético residual continuado para a altitude de 2000 m

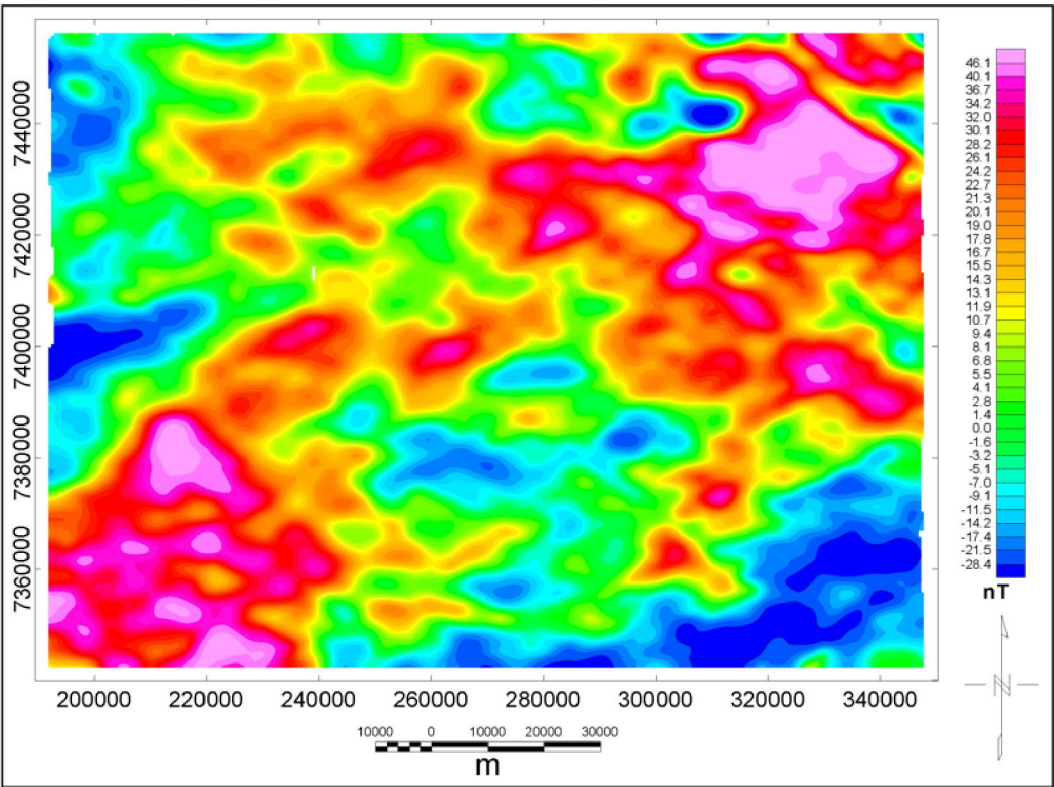
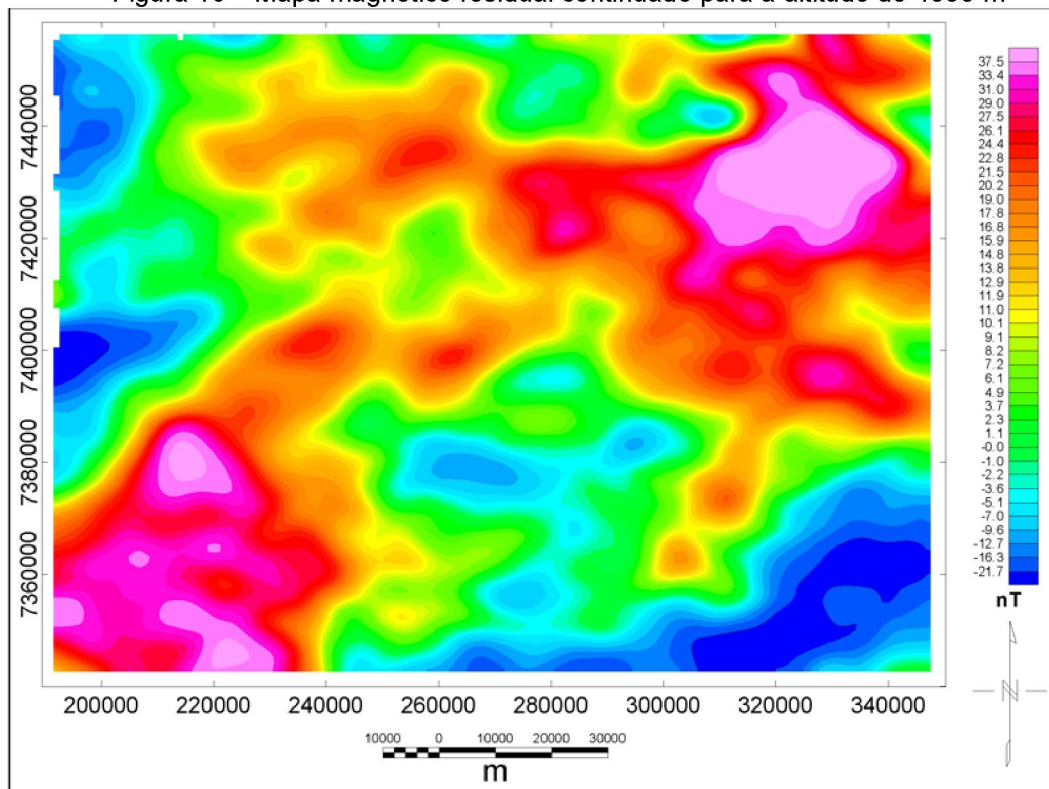




Figura 19 - Mapa magnético residual continuado para a altitude de 4000 m



#### 6.2.4. Sinal analítico

O sinal analítico é uma função complexa, também muito empregada no mapeamento magnético. Uma das principais vantagens deste método, além de demarcar os limites do corpo, é que os resultados independem da direção de magnetização. Em outras palavras, um corpo com uma determinada geometria e contraste de susceptibilidade magnética mostra o mesmo sinal analítico em qualquer latitude da Terra (Hsu *et al.*, 1998).

Nabighian (1972) definiu inicialmente a noção de sinal analítico como um “campo complexo derivado de um campo potencial”. A aplicação desta função é baseada no uso das derivadas horizontais e vertical de campos potenciais.

Nabighian (1984, *apud* Hsu *et al.*, 1996), definiu o sinal analítico simples através da equação:

$$A(x,y) = (M_x X + M_y Y + M_z Z),$$



onde  $M_z = dM/dz$  representa a primeira derivada vertical,  $M_x$  e  $M_y$  representam as primeiras derivadas horizontais do campo magnético nas direções x e y ;  $x$ , y e z são os vetores unitários nestas direções.

A função amplitude do sinal analítico de ordem zero (simples), representando seu valor absoluto, que pode ser expressa através de um vetor adição de duas componentes reais (nas direções x e y) e uma componente imaginária (direção z), é representada pela seguinte equação:

$$|A(x,y)| = [(M_x)^2 + (M_y)^2 + (M_z)^2]^{1/2}$$

A função amplitude do sinal analítico tem formato de sino (*bell shaped*), sua amplitude máxima situa-se exatamente sobre o topo da fonte, e suas dimensões se relacionam diretamente com a profundidade do corpo, em qualquer ordem de derivação (Nabighian, 1974), o que explica sua ampla utilização no mapeamento magnético.

Por sua vez, aplicando a função sinal analítico sobre a primeira derivada vertical (ordem zero), e não sobre o campo magnético residual original, torna-se possível delimitar anomalias causadas por estruturas muito próximas a superfície do terreno, até então identificadas por uma só anomalia (Debeglia e Corpel, 1997), resultando no mapa de amplitude do sinal analítico de ordem um (primeira ordem).

Tentando facilitar a visualização do processamento geofísico através da utilização das derivadas horizontais e vertical, e do sinal analítico, Roest *et al.* (1992) criou um esboço (Figura 20) onde, através da geração de um modelo teórico, são exibidas as anomalias esperadas para cada uma das etapas do processamento.

As Figuras 21, 22, 23 e 24 mostram, respectivamente, os mapas de amplitude do sinal analítico de ordem zero para os dados originais (450 m) e para as continuações a 1000, 2000 e 4000 m.

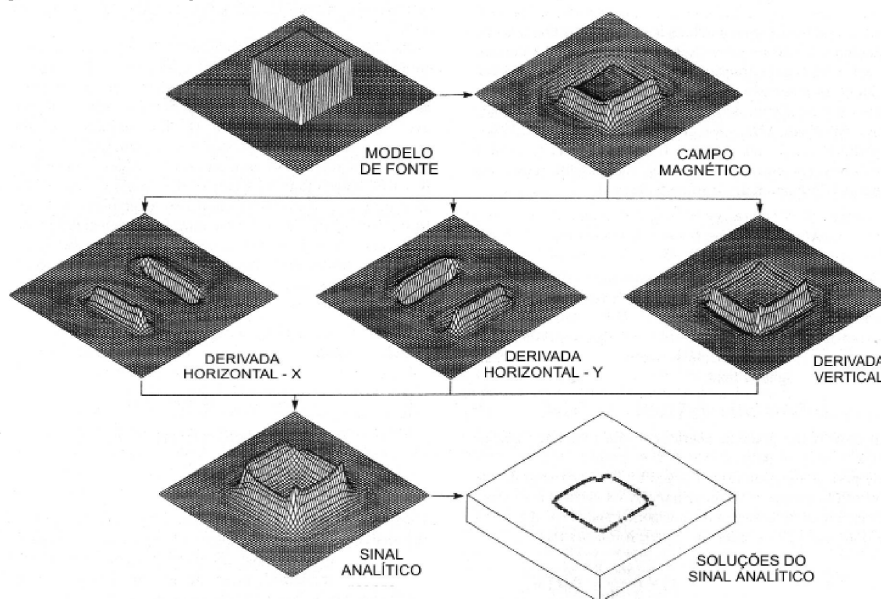
Figura 20 - Esboço do método do sinal analítico, modificado de Roest *et al.* (1992)

Figura 21 - Amplitude do sinal analítico de ordem zero para a os dados originais (450 m)

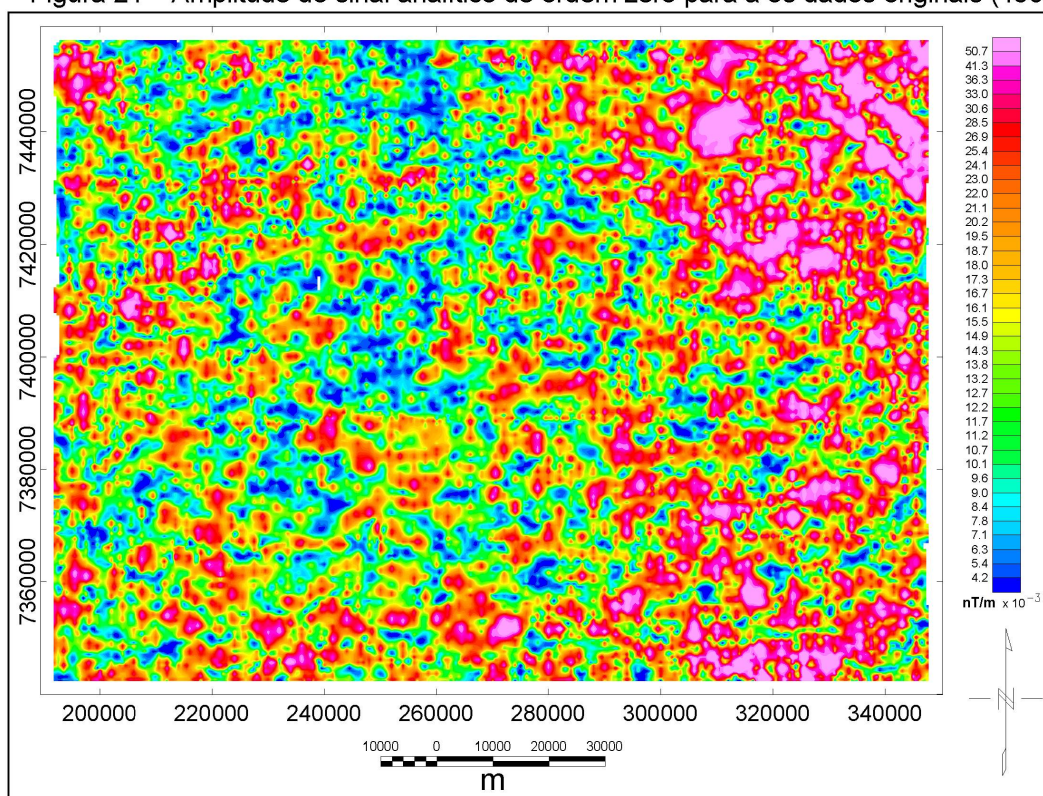




Figura 22 - Amplitude do sinal analítico de ordem zero para a continuação a 1000 m

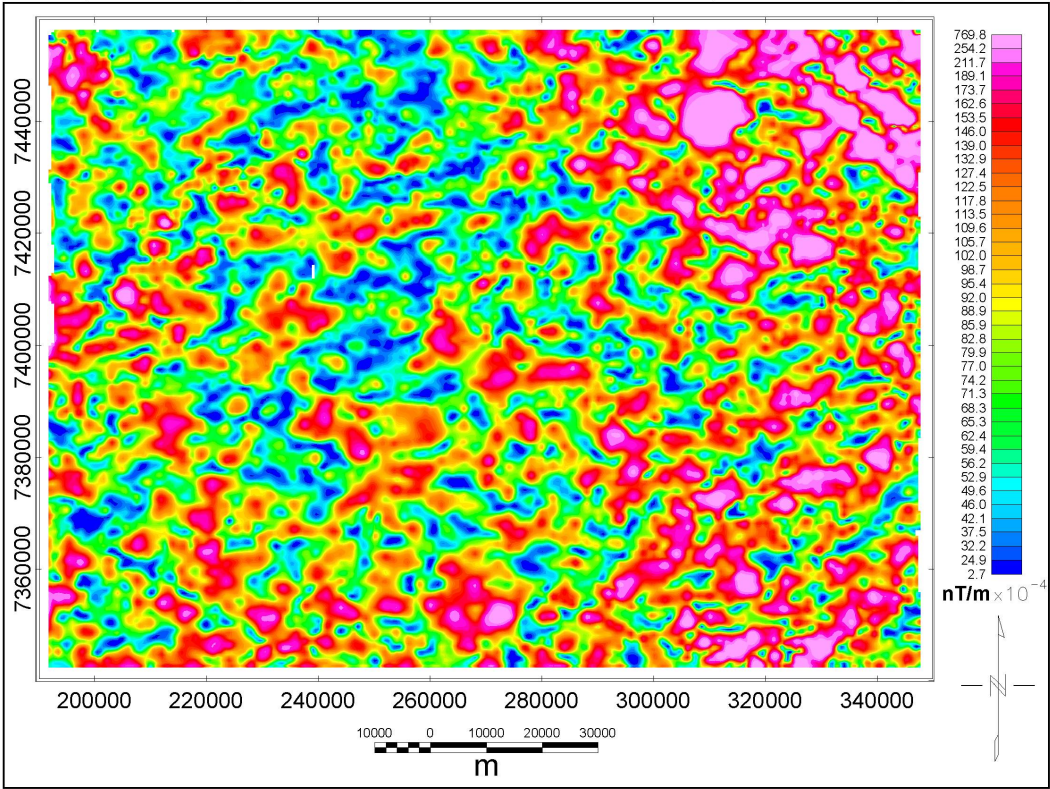


Figura 23 - Amplitude do sinal analítico de ordem zero para a continuação a 2000 m

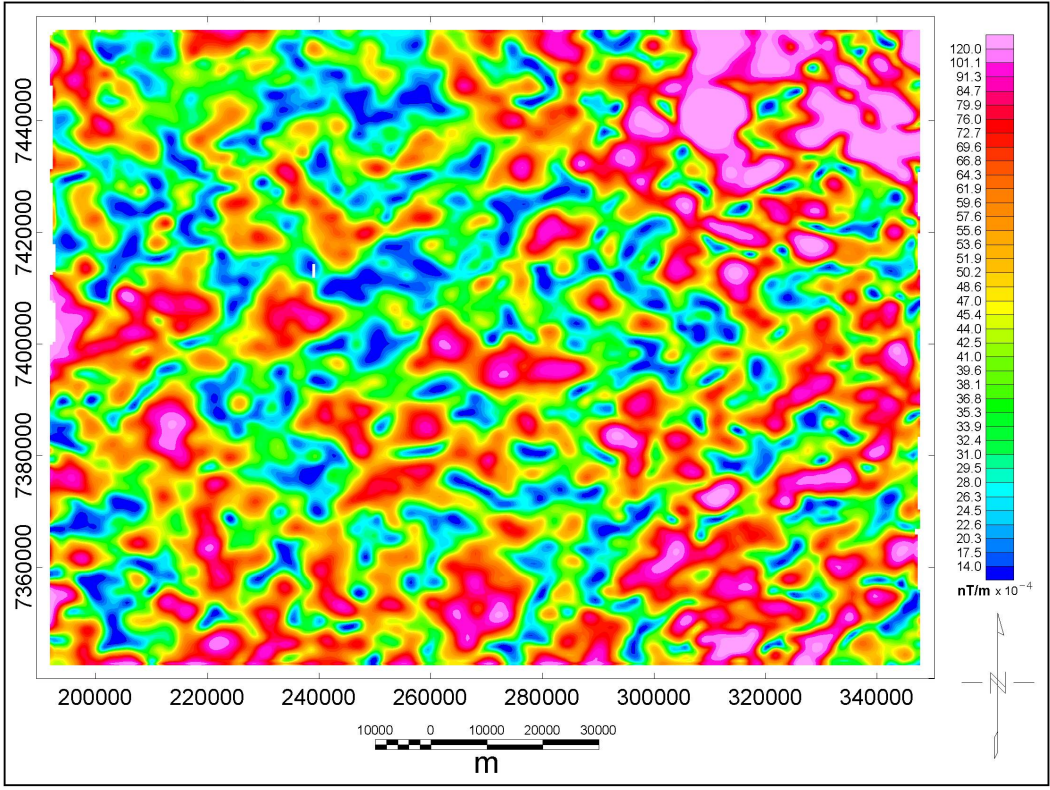
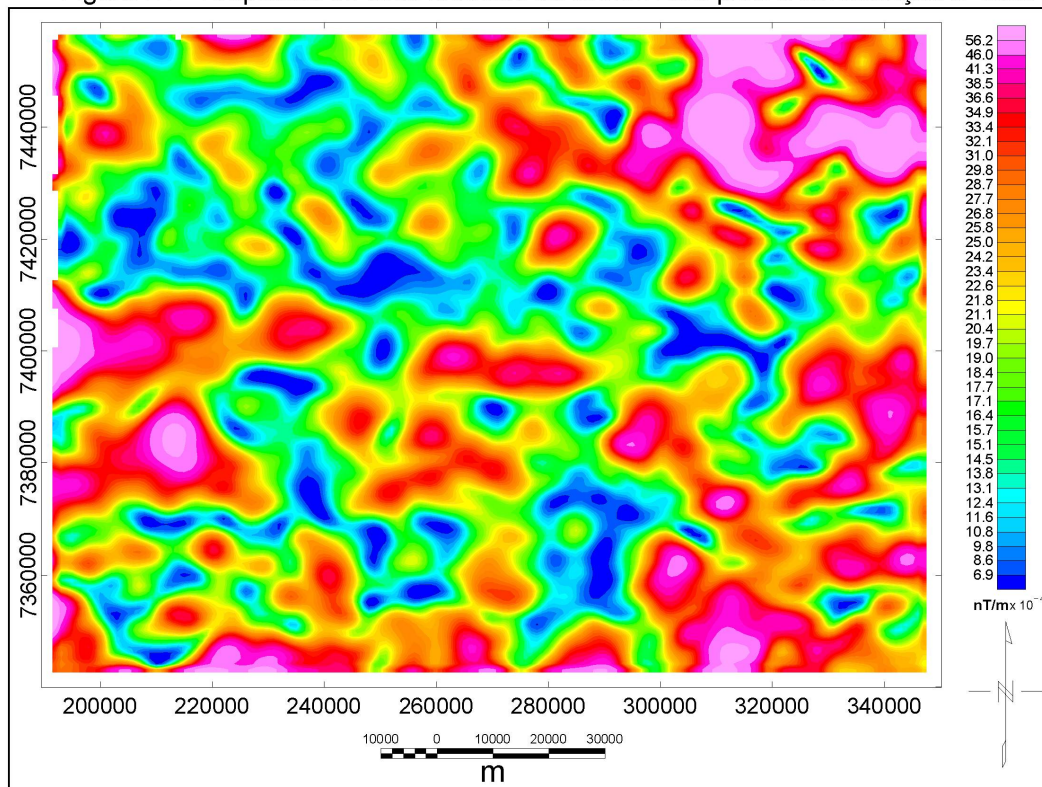


Figura 24 - Amplitude do sinal analítico de ordem zero para a continuação a 4000 m



#### 6.2.5. Fase do sinal analítico

A fase do sinal analítico de ordem zero é definida pelo ângulo formado entre os vetores imaginário e real do sinal analítico de mesma ordem, representando o quociente da primeira derivada vertical pelo gradiente horizontal total, e pode ser expressa por:

$$\Phi(x,y) = \arctg (M_z)/[(M_x)^2 + (M_z)^2]^{1/2}$$

Thurston e Smith (1997) demonstraram, a partir da teoria proposta por Nabighian (1984), que a fase do sinal analítico permite realizar estimativas sobre o mergulho e o contraste de susceptibilidade magnética das fontes causadoras de anomalias.

A aplicação da fase do sinal analítico é bastante útil, uma vez que a amplitude deste sinal pode sofrer alterações no interior de uma mesma estrutura, porém sua fase permanece constante. A comparação entre a amplitude e a fase do sinal analítico torna mais segura a interpretação de



continuidade das estruturas. A interpretação isolada da fase do sinal analítico encerra muita ambigüidade, uma vez que o processamento não distingue os sinais derivados das estruturas geológicas dos ruídos, resultando em uma série de artefatos espúrios dispersos no contexto das anomalias reais.

Os mapas da fase do sinal analítico para os dados originais e para as continuações a 1000, 2000 e 4000 m são exibidos, respectivamente, nas Figuras 25, 26, 27 e 28.

Figura 25 - Fase do sinal analítico de ordem zero para os dados originais (450 m)

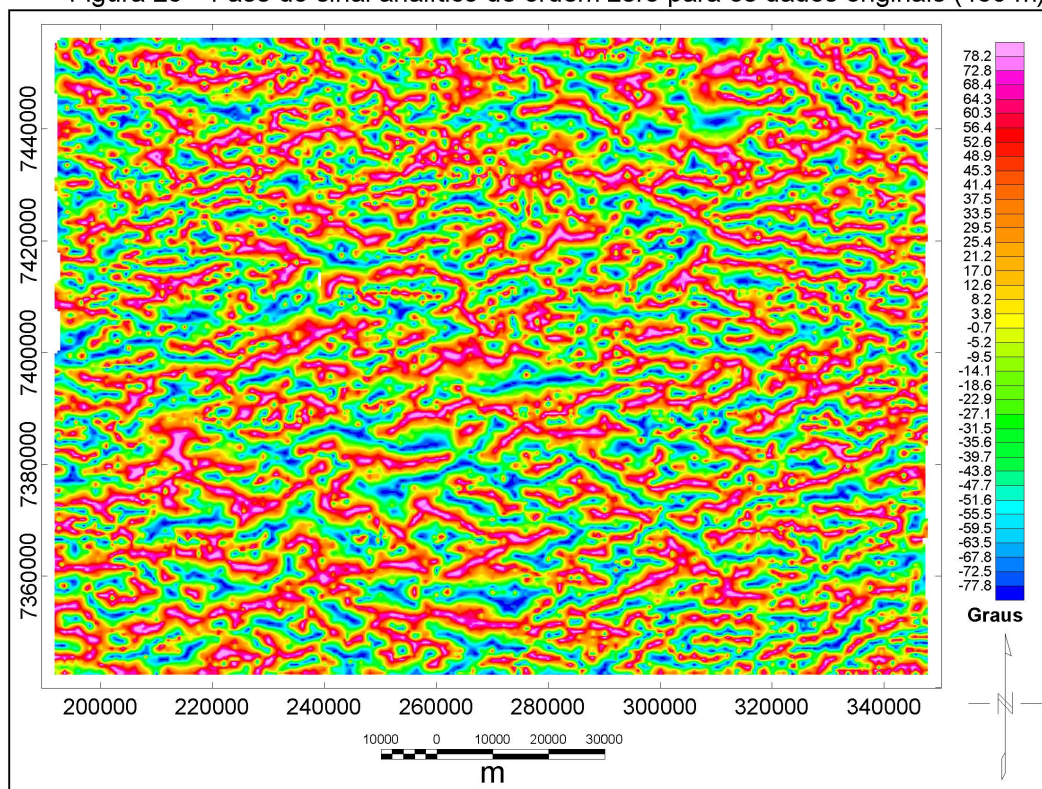


Figura 26 - Fase do sinal analítico de ordem zero para a continuação de 1000 m

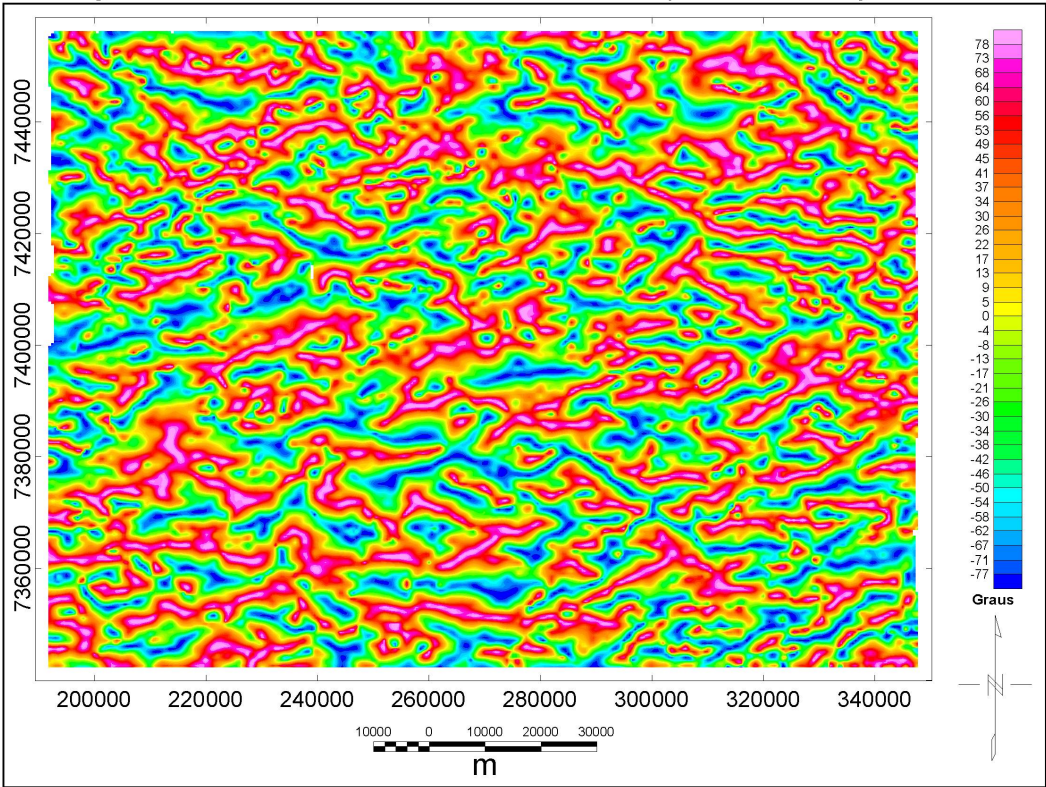


Figura 27 - Fase do sinal analítico de ordem zero para a continuação a 2000 m

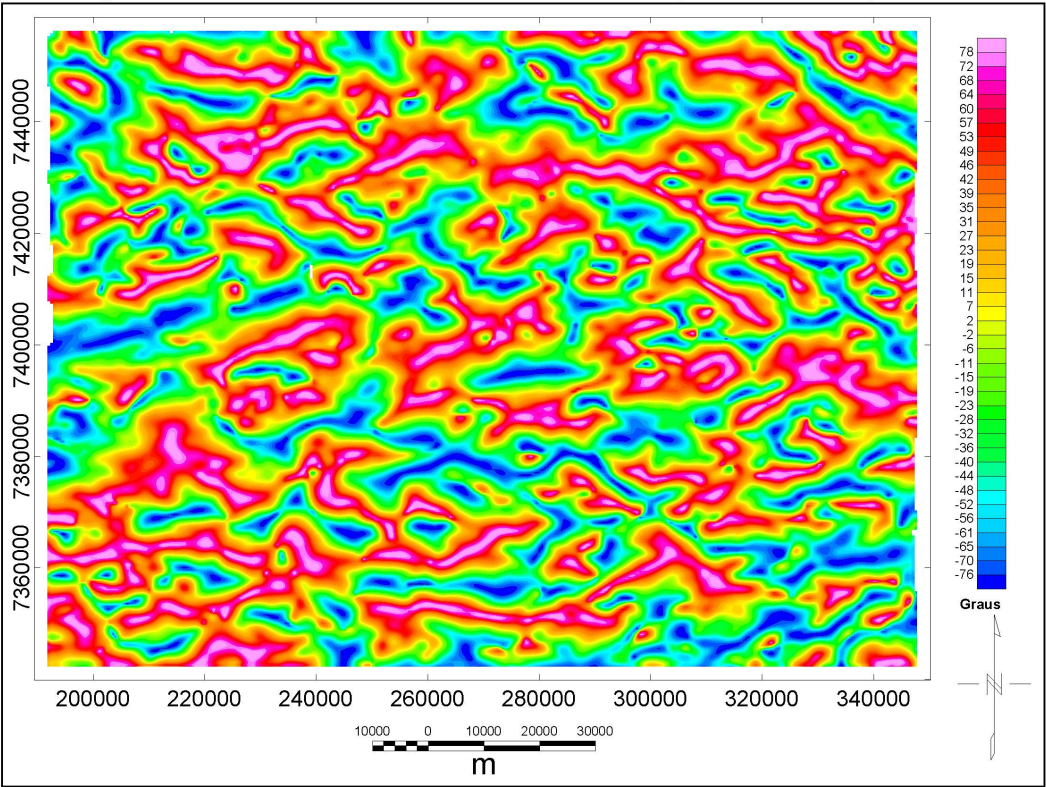
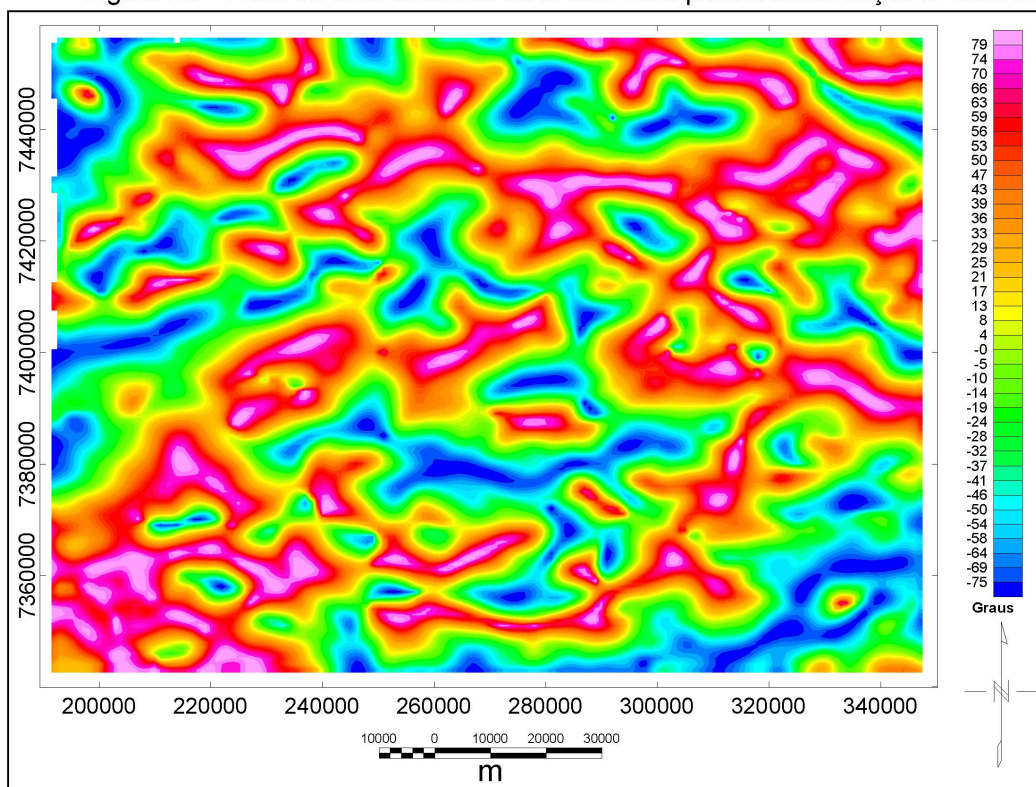




Figura 28 - Fase do sinal analítico de ordem zero para a continuação a 4000 m



#### 6.2.6. Gradiente horizontal total

O cálculo das derivadas horizontais do campo magnético permite, através da análise da malha resultante, identificar mudanças abruptas no campo magnético, obtendo bons resultados no mapeamento geológico. O gradiente horizontal total de ordem zero é o vetor resultante das combinações das primeiras derivadas horizontais nas direções  $x$  e  $y$ , dado pela equação abaixo:

$$h(x,y) = [(M_x)^2 + (M_y)^2]^{1/2}$$

onde  $M_x = dM/dx$  e  $M_y = dM/dy$  correspondem às primeiras derivadas horizontais da anomalia  $M$  do campo magnético.

Segundo Milligan e Gunn (1997) esta técnica envolve uma transformação de fase, que ressalta os picos das anomalias, aproximadamente sobre as bordas de corpos espessos, realçando as altas frequências e

proporcionando um aumento da definição das bordas dos corpos, através do estreitamento dos picos anômalos.

Neste trabalho foi utilizada apenas uma ordem de derivação, correspondendo às primeiras derivadas horizontais do campo magnético.

O procedimento do gradiente horizontal total de ordem zero foi aplicado aos dados originais e aos três níveis continuados, cujos mapas são mostrados respectivamente nas Figuras 29, 30, 31 e 32. Para cada um dos mapas foram interpretados alinhamentos magnéticos, os quais foram posteriormente integrados aos mapas provenientes das demais etapas do processamento (amplitude e fase do sinal analítico e deconvolução de Euler), correspondentes aos níveis de continuação mencionados.

Figura 29 - Mapa do gradiente horizontal total de ordem zero para os dados originais (450 m)

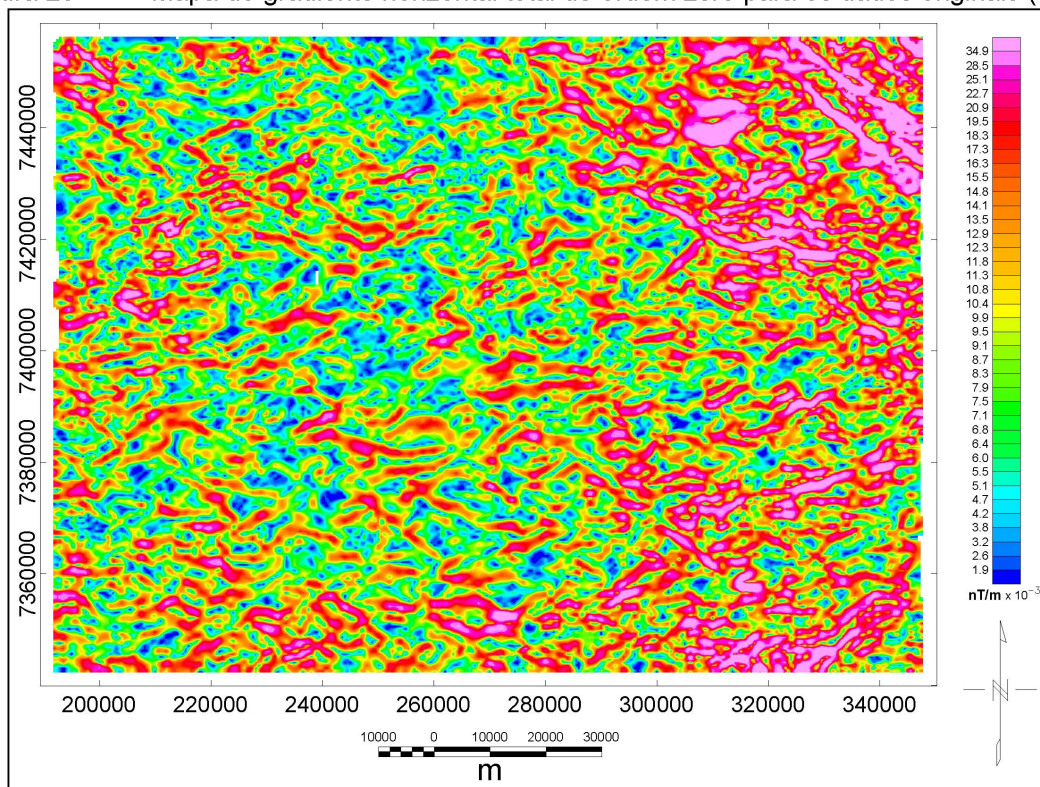




Figura 30 - Mapa do gradiente horizontal total de ordem zero para a continuação a 1000 m

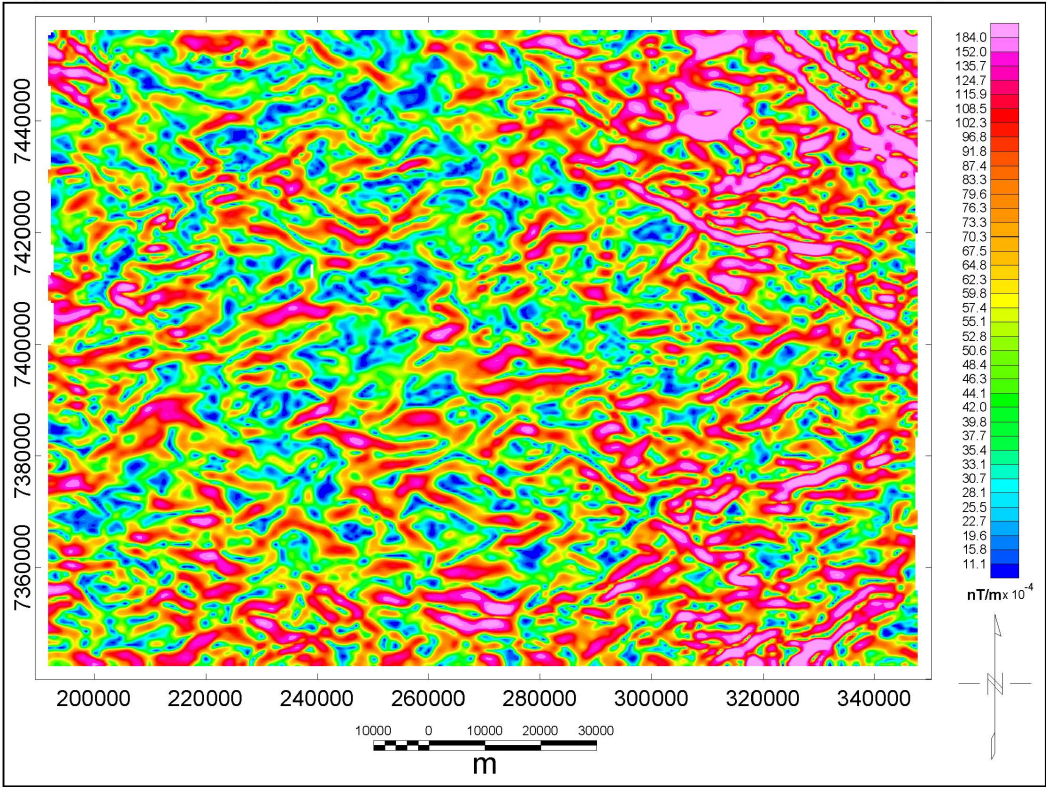


Figura 31 - Mapa do gradiente horizontal total de ordem zero para a continuação a 2000 m

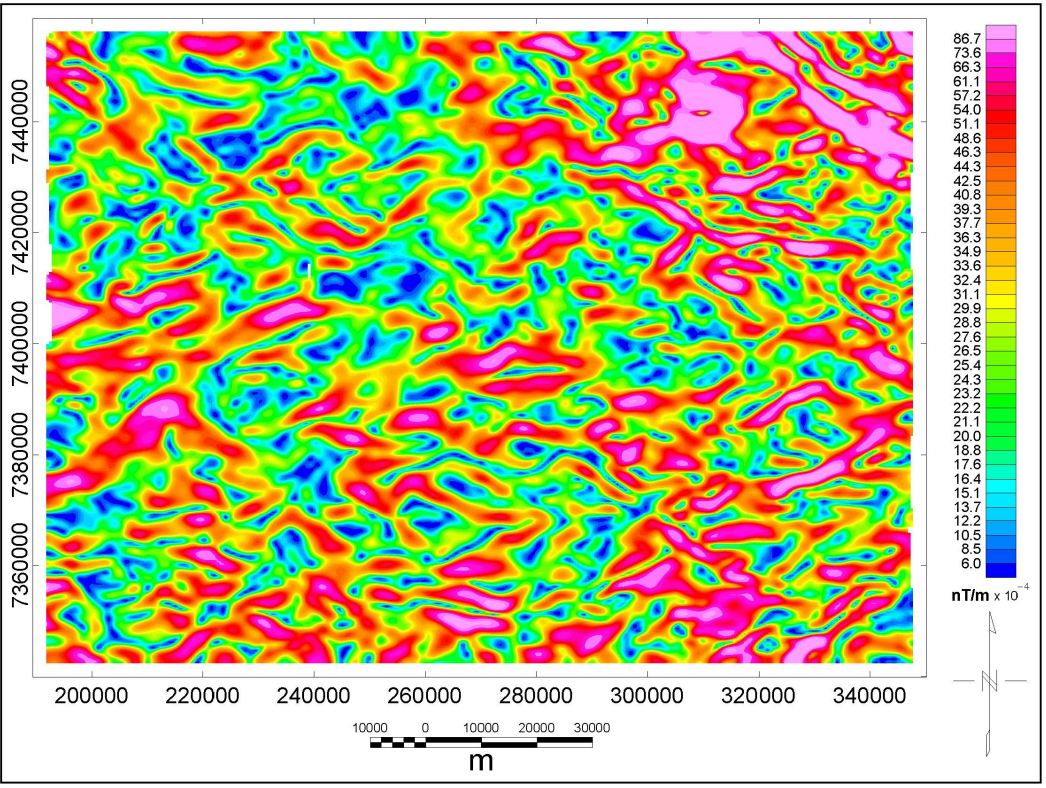
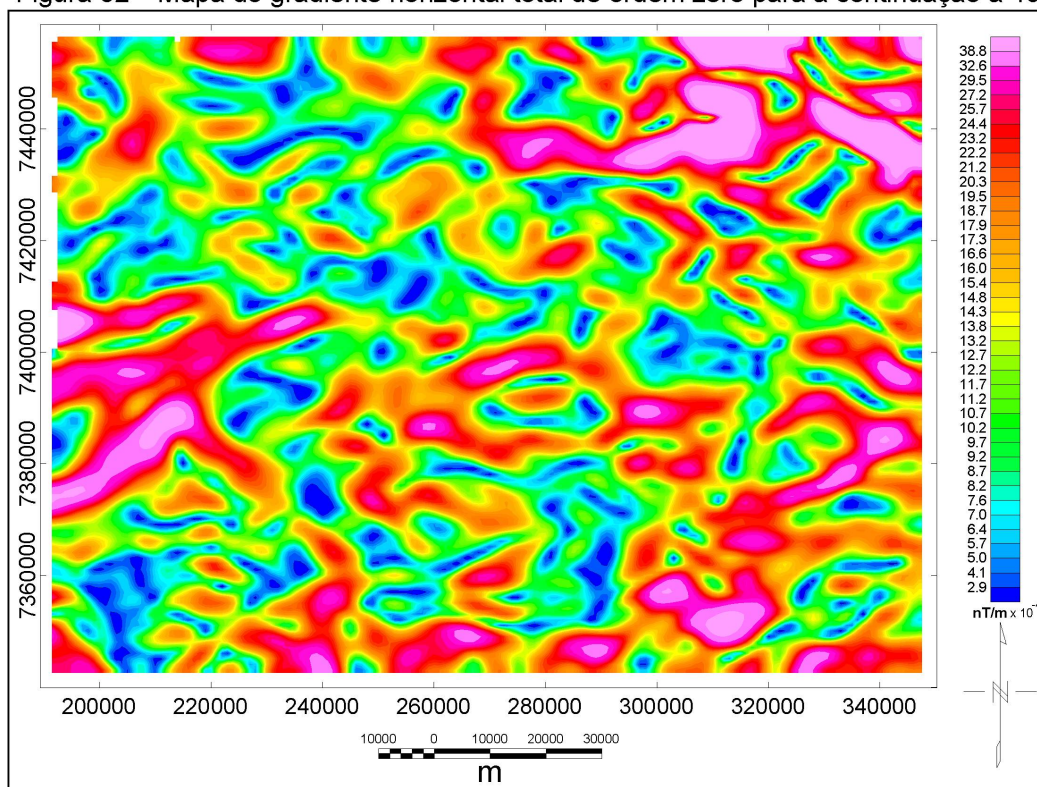


Figura 32 - Mapa do gradiente horizontal total de ordem zero para a continuação a 4000 m



### 6.2.7. Deconvolução de Euler

O termo deconvolução, que representa os processos utilizados para eliminar ou atenuar efeitos de natureza convulacional, apesar de estar presente no aplicativo computacional utilizado, não é adequado para descrever a forma através da qual o cálculo é realizado, tratando-se, mais apropriadamente, de uma modelagem das anomalias.

O método aplica uma varredura nos dados residuais, selecionando anomalias, através de janelas móveis, sobre as quais estima as profundidades das fontes geradoras.

De acordo com o manual da Deconvolução de Euler (Copyright 2002<sup>©</sup>, Geosoft Inc.), o método *Standard* de Euler é baseado na equação de homogeneidade de Euler, que relaciona o campo magnético e suas derivadas horizontais e vertical com a localização da fonte, através do grau de homogeneidade ( $\eta$ ), interpretado como um índice estrutural (Thompson, 1982). O índice estrutural é a medida da taxa de mudança da intensidade do campo



potencial frente à distância entre a fonte e o detector, para uma determinada geometria.

O sistema usa o método dos mínimos quadrados para resolver a equação de Euler, em cada ponto do *grid*, dentro de uma janela pré-estabelecida. Uma janela quadrada de 10 por 10 vezes o tamanho da célula de interpolação, por exemplo, move-se através das colunas do *grid*. Cada ponto da malha envolve 100 equações (10 x 10), as quais encerram quatro variáveis desconhecidas (localização de X, Y, Z e o valor do *background* – B do campo magnético), além dos erros (desvios padrão). Estas soluções são obtidas para um determinado índice estrutural ( $\eta$ ). A solução é considerada válida se a profundidade calculada for menor que a tolerância especificada e se a localização da fonte estiver a uma distância limite do centro da janela, também definida. Ao fim do processo o sistema gera um arquivo com as soluções.

Para dados de campos potenciais, a equação de Euler pode ser assim formulada:

$$(x - x_0) dT/dx + (y - y_0) dT/dy + (z - z_0) dT/dz = \eta(B - T),$$

onde  $x_0$ ,  $y_0$ , e  $z_0$  marcam a posição da fonte magnética e  $T$  é o campo medido no ponto  $(x, y, z)$ . O valor  $B$  representa o regional do campo e  $\eta$  o grau de homogeneidade (índice estrutural). Esta equação é facilmente resolvida para corpos magnéticos de forma simples (Thompson, 1982).

Para a resolução da equação, um dipolo magnético corresponde a um índice estrutural  $\eta = 3$ , enquanto um pólo magnético (teórico) e uma linha de dipolos equivalem a  $\eta = 2$ . Já para um dique estreito 2-D,  $\eta = 1$ . Reid *et al.* (1990) mostraram que um contato magnético tem  $\eta = 0.5$ , desde que um *offset*  $A$  seja introduzido para incorporar fatores como amplitude da anomalia, direção e mergulho do corpo, da seguinte forma:

$$(x - x_0) dT/dx + (y - y_0) dT/dy + (z - z_0) dT/dz = A$$

A escolha do índice estrutural é decorrente do conhecimento *a priori* da geologia local, usualmente utilizando os valores padrão:

Corpo Magnético	Índice Estrutural
Contato geológico	0
Degrau magnético	0,5
Soleira / dique	1
Cilindro / <i>pipe</i>	2
Esfera	3

A partir um conjunto de dados de campos potenciais, pode-se determinar a localização ótima da fonte ( $x_0$ ,  $y_0$ ,  $z_0$ ) resolvendo a equação de Euler para um determinado índice estrutural  $\eta$ , pela inversão dos dados, usando os mínimos quadrados. O processo de inversão também envolve erros (desvios padrão) no ajuste de cada parâmetro, os quais podem ser usados como indicativos de aceitação ou rejeição das soluções. Este processo de inversão é denominado deconvolução de Euler.

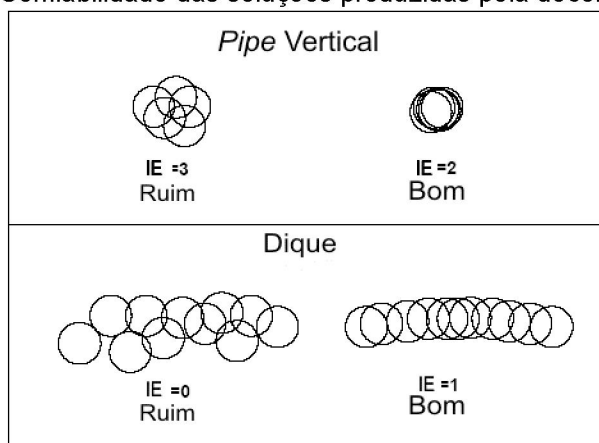
No método padrão de Euler, a modelagem é realizada sobre uma janela quadrada selecionada do *grid* do campo potencial e de suas derivadas ortogonais, resolvendo o posicionamento das fontes ( $x_0$ ,  $y_0$ ,  $z_0$ ) e os erros associados, salvando as soluções, caso as mesmas contemplem certos critérios, e movendo a janela para a próxima posição da malha. A janela de busca é centrada em cada posição da solução. Todos os pontos das janelas são usados para resolver as soluções de Euler, relativas a profundidades e localizações de fontes. A janela deve ser suficientemente grande para incluir cada solução da anomalia de interesse, mas não tão grande para incorporar anomalias adjacentes. As soluções de profundidade (desvios padrão) que excedem um limite definido de tolerância (normalmente 15%) e ultrapassem uma distância fixada entre a fonte e a janela, são rejeitadas. Cabe ao intérprete a seleção das soluções restantes, de modo que estas sejam coerentes com a realidade geológica.

Uma vantagem significativa da equação de Euler, quando aplicada a dados de campos magnéticos, é que ela é independente da declinação, inclinação e remanência da fonte, desde que estas integrem uma parte da constante na função da anomalia de um dado modelo. Entretanto, problemas existem com feições geológicas posicionadas segundo a direção norte-sul, em baixas latitudes magnéticas, como no Brasil, porque, nestas situações, o sinal detectado é baixo em relação ao ruído. Uma discussão mais detalhada do método de deconvolução de Euler foi realizada por Reid *et al.* (1990).

Neste trabalho a deconvolução de Euler foi testada nos dados originais (450 m) e nas três continuações ascendentes (1000, 2000 e 4000 m), sob diversos índices estruturais, bem como sob vários tamanhos de janelas de busca. Os melhores tamanhos de janelas de busca variaram entre 3500 e 10000 m, enquanto os índices que resultaram em mapas com melhor definição oscilaram entre 0 e 1, condicionados pela geometria linear das descontinuidades dos basaltos da Formação Serra Geral. A qualidade de um mapa de soluções de Euler é definida pelo grau de alinhamento das soluções. Quando estas são alinhadas, no caso de estruturas lineares, ou delimitam um ponto, quando em estruturas geológicas do tipo *pipe*, com pouca continuidade lateral, os resultados são considerados bons, enquanto soluções dispersas indicam resultados insatisfatórios, conforme mostra a Figura 33.

Utilizando este critério para avaliar a qualidade dos resultados foram selecionados seis mapas de profundidades das fontes das anomalias. Sobre os dados originais, adquiridos a 450 metros de altura, a modelagem resultou em somente um mapa de soluções satisfatórias, utilizando janela de busca de 3500 m e índice estrutural 0, mostrado na Figura 34. Para a continuação a 1000 m foram utilizados o mapa da Figura 36, gerado com janela de busca de 5000 m e índice estrutural 1 e o mapa da Figura 38, construído com janela de busca de 10000 m e índice estrutural 0,5.

Figura 33 - Confiabilidade das soluções produzidas pela deconvolução de Euler



Para a continuação a 2000 m foram utilizados os mapas construídos com janela de busca de 10000 m, utilizando os valores de 0 (Figura 40) e 1 (Figura 42) para os índices estruturais, enquanto que para a continuação a 4000 m somente o mapa gerado com janela de busca de 10000 m e índice estrutural 0 obteve resultados satisfatórios (Figura 44).

Os resultados qualitativos e quantitativos da modelagem são descritos a seguir:

**Dados originais (450 m) – Janela de busca de 3500 m – Índice estrutural 0**

Devido aos dados originais apresentarem muitas anomalias de alta frequência, a modelagem resultou numa grande quantidade de soluções de fontes, em sua maioria localizadas em profundidades não superiores a 1000 m, mostrando-se na forma de alinhamentos bem definidos em direções variadas, como pode ser visto no mapa da Figura 34.

O histograma construído com as soluções calculadas pelo aplicativo mostra variação de fontes deste 0 até 1500 m, com classe modal preferencial entre 500 e 600 metros de profundidade (Figura 35).

Figura 34 - Mapa de soluções de Euler para os dados originais (450 m), janela de busca de 3500 m e índice estrutural 0

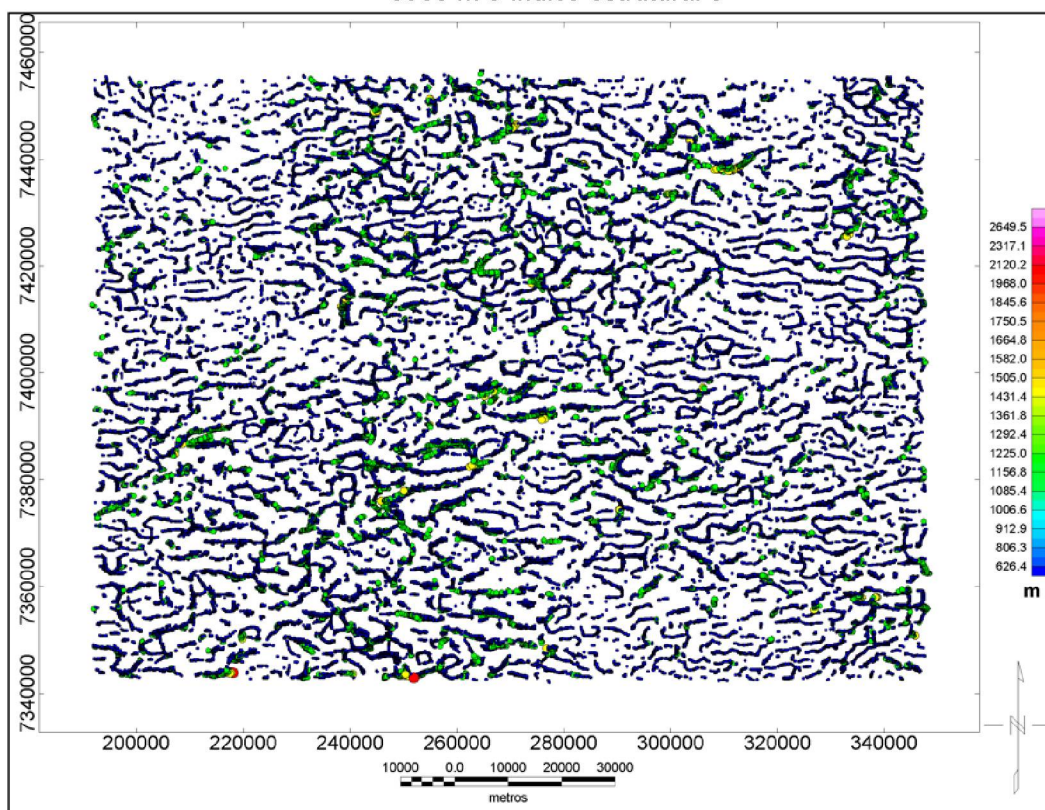
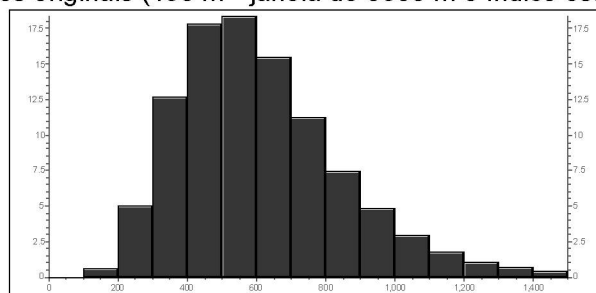


Figura 35 - Histograma de frequência de soluções de profundidades de Euler para os dados originais (450 m - janela de 3500 m e índice estrutural 0)



#### Continuação a 1000 m – Janela de busca de 5000 m – Índice estrutural 1

Conforme pode se observar no mapa da Figura 36 foram modelados uma grande quantidade de alinhamentos de fontes magnéticas, amplamente distribuídos pela área. Os alinhamentos localizados entre 600 e 1500 m de profundidade foram os que apresentaram os melhores resultados.

A distribuição das profundidades, exibida no histograma da Figura 37, mostra que a maioria das soluções situa-se entre as profundidades de 500 e 3500 m, com moda entre 1750 e 2000 metros.



Figura 36 - Mapa de soluções de Euler para a continuação a 1000 m, janela de busca de 5000 m e índice estrutural 1

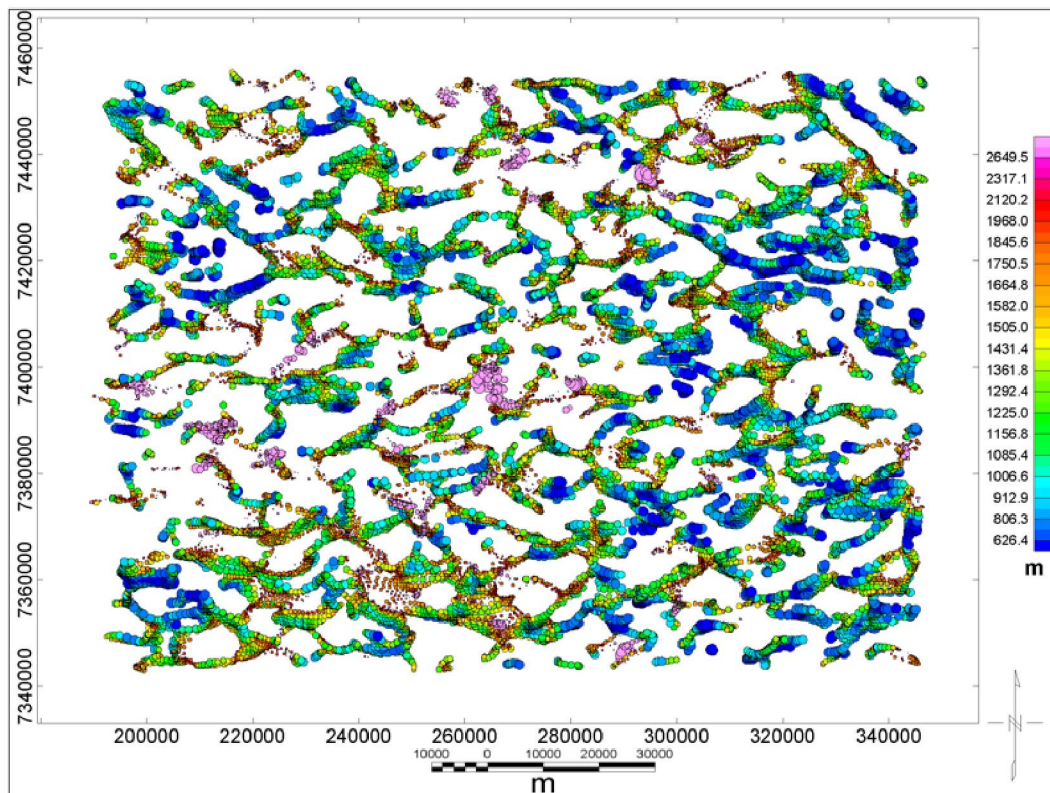
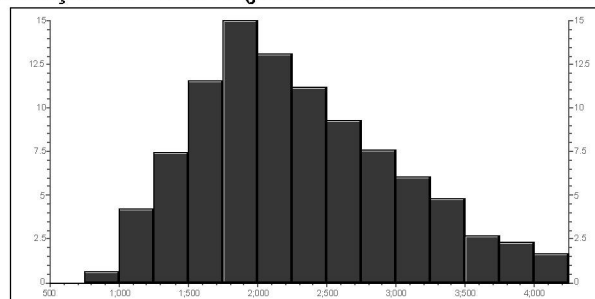


Figura 37 - Histograma de frequência de soluções de profundidades de Euler para a continuação de 1000 m (janela de 5000 m e índice estrutural 1)



### Continuação a 1000 m – Janela de busca de 10000 m – Índice estrutural 0,5

O mapa de soluções mostrado na Figura 38 exibe boas modelagens para os alinhamentos localizados entre 500 e 1000 m. Em maiores profundidades, entre 1000 e 1500 m, poucos alinhamentos são significativos, com exceção daqueles localizados no extremo norte da área, com direção E-W.

A partir do histograma da Figura 39 pode ser observado que a maioria dos alinhamentos estão localizados entre 250 e 2500 m, com moda entre 750 e 1000 m.



Figura 38 - Mapa de soluções de Euler para a continuação a 1000 m, janela de busca de 10000 m e índice estrutural 0,5

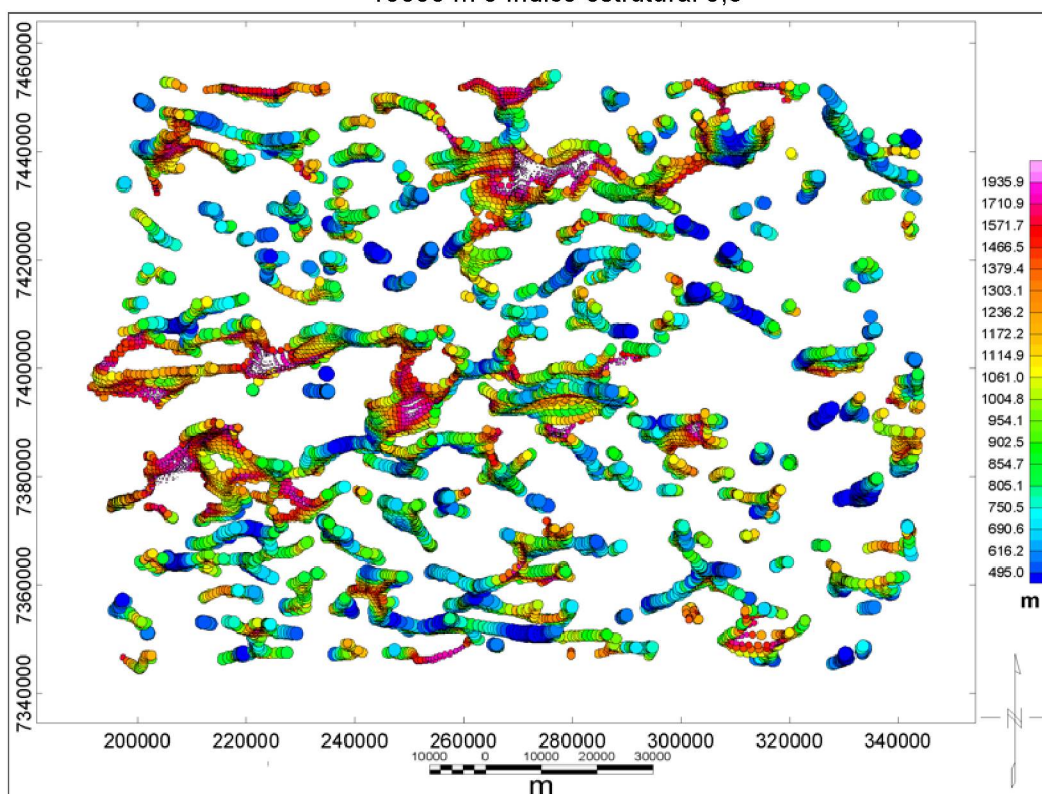
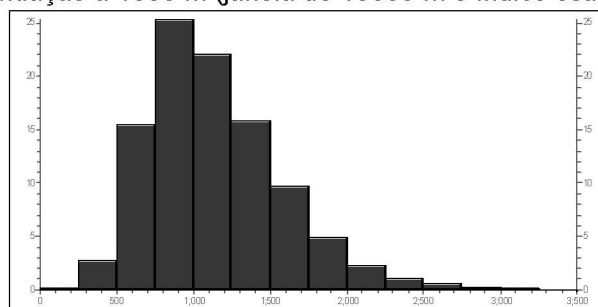


Figura 39 - Histograma de frequência de soluções de profundidades de Euler para a continuação a 1000 m (janela de 10000 m e índice estrutural 0,5)



#### Continuação a 2000 m – Janela de busca de 10000 m – Índice estrutural 0

Os melhores alinhamentos modelados (Figura 40) estão localizados entre as profundidades de 400 e 1300 m, principalmente mais rasos que 900 m. Nota-se também uma diminuição na quantidade de alinhamentos modelados, em comparação aos mapas continuados a 1000 m.

O histograma da Figura 41 exibe uma maior concentração das soluções entre 250 e 2500 m, com moda, entre 750 e 1250 m.

Figura 40 - Mapa de soluções de Euler para a continuação a 2000 m, janela de busca de 1000 m e índice estrutural 0

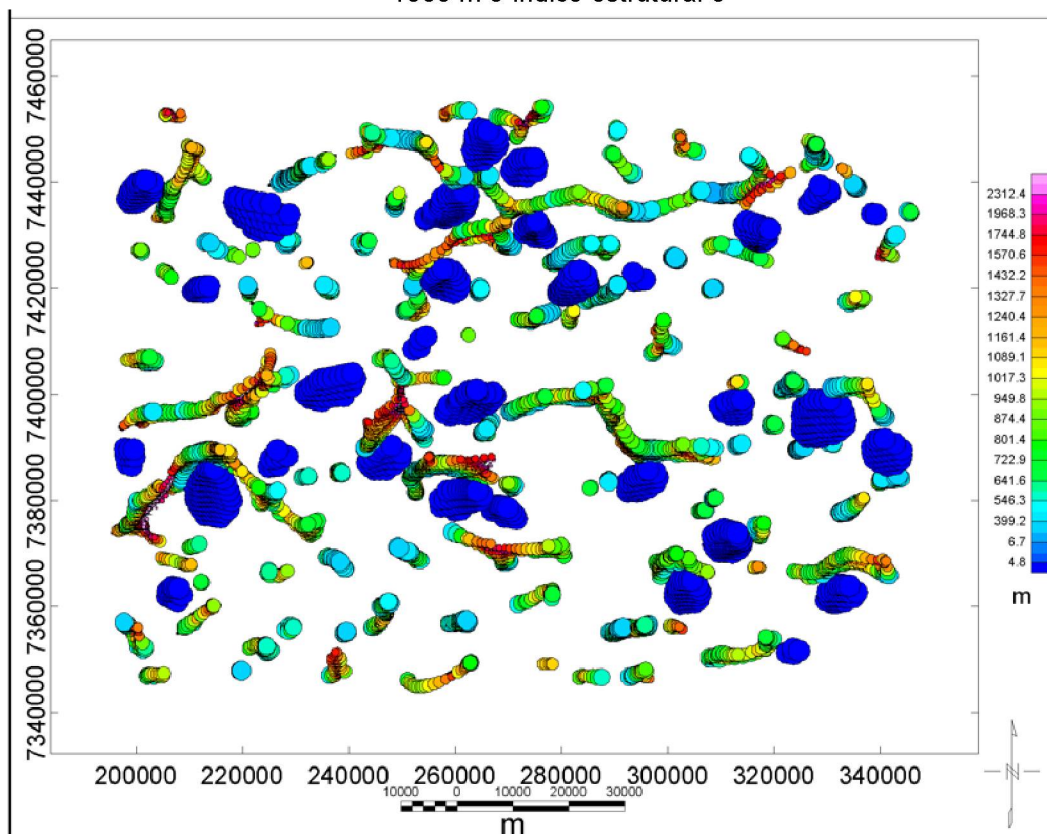
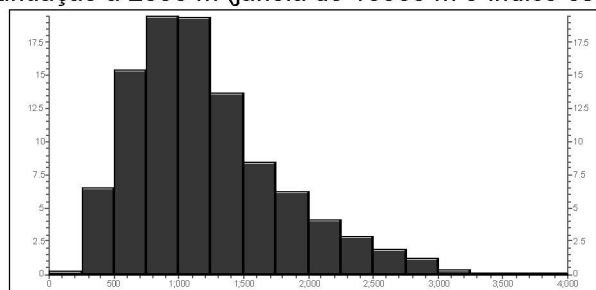


Figura 41 - Histograma de frequência de soluções de profundidades de Euler para a continuação a 2000 m (janela de 10000 m e índice estrutural 0)



#### Continuação a 2000 m – Janela de busca de 10000 m – Índice estrutural 1

A Figura 42 exibe poucos e descontínuos alinhamentos de soluções, com profundidades variando entre 1800 e 5200 m, representando, como esperado, as maiores profundidades da área de estudo. Os melhores ajustes ficaram restritos entre 1800 a 4000 m. Os alinhamentos mais profundos, com poucas exceções, não responderam satisfatoriamente à modelagem.

O histograma da Figura 43 mostra uma ampla distribuição de profundidades, cuja maioria situa-se entre 750 e 4500 m, com classe modal entre 2000 e 2250 m.

Figura 42 - Mapa de soluções de Euler para a continuação a 2000 m, janela de busca de 10000 m e índice estrutural 1

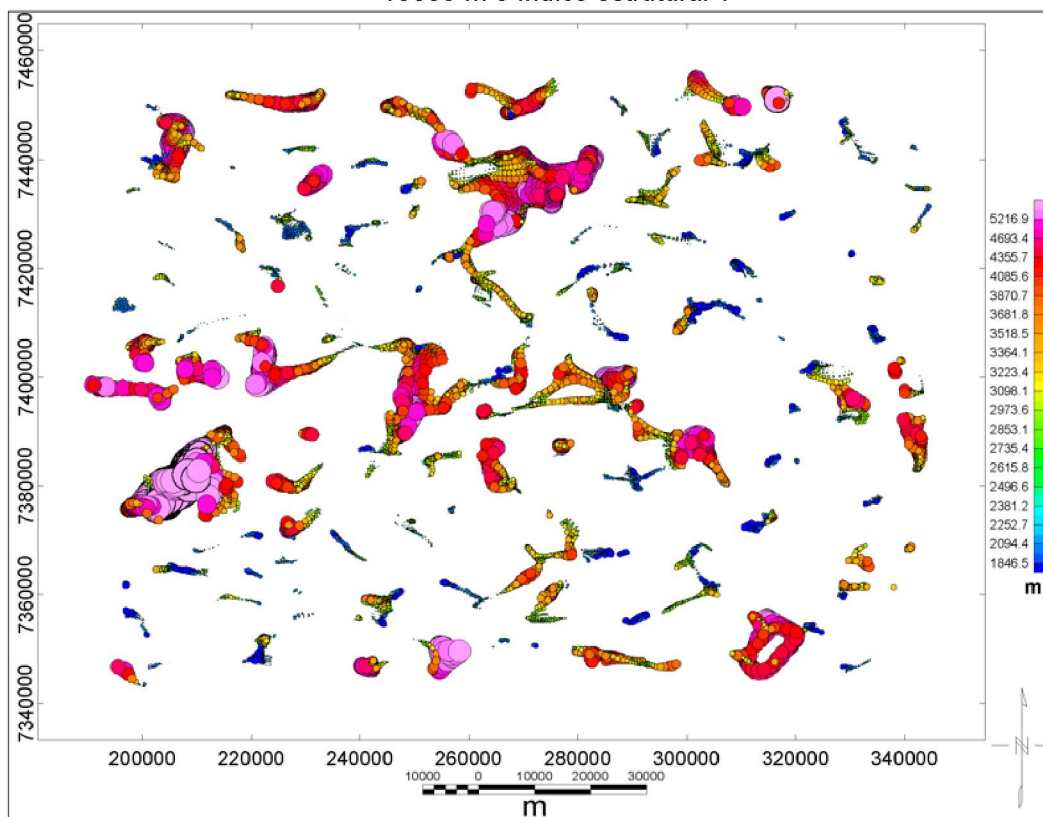
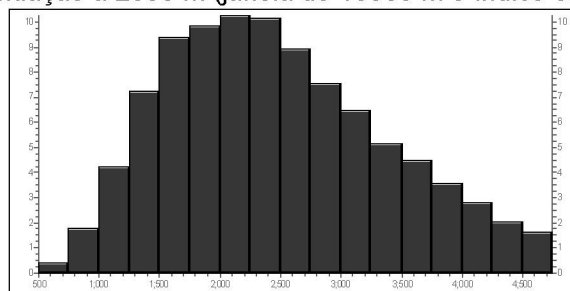


Figura 43 - Histograma de frequência de soluções de profundidades de Euler para a continuação a 2000 m (janela de 10000 m e índice estrutural 1)



#### Continuação a 4000 m – Janela de busca de 10000 m – Índice estrutural 0

Este mapa (Figura 44) exibe pouquíssimos alinhamentos de fontes modelados, decorrentes do nível de continuação ascendente. Os principais resultados situam-se entre 1000 e 3500 metros, e exibem bom alinhamento.

O histograma de frequência das soluções para este mapa, mostrado na Figura 45, mostra uma concentração entre 1000 e 3500 m, com classe modal entre 1750 e 2000 m.

Figura 44 - Mapa de soluções de Euler para a continuação a 4000 m, janela de busca de 10000 m e índice estrutural 0

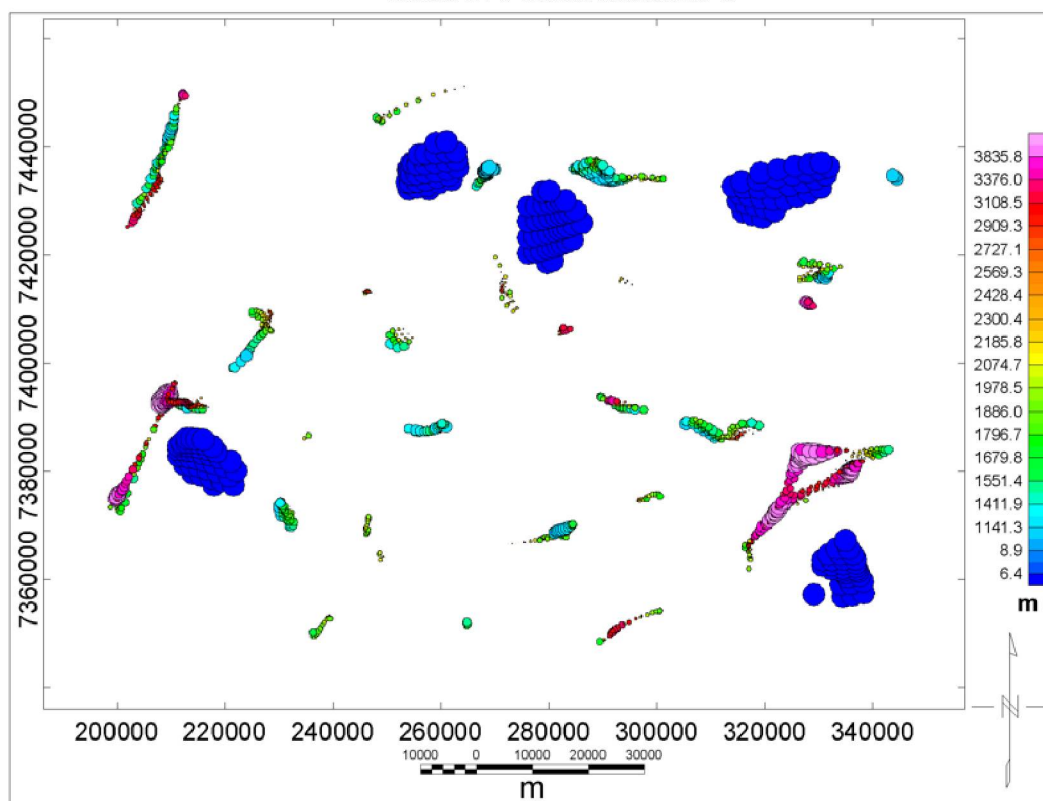
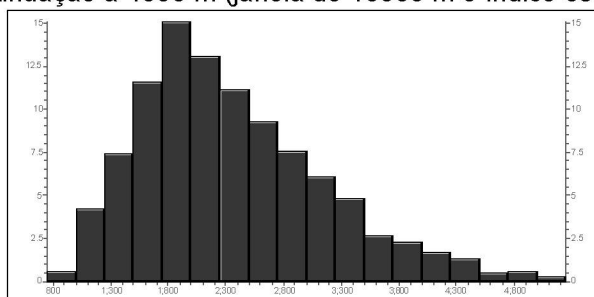


Figura 45 - Histograma de frequência de soluções de profundidades de Euler para a continuação a 4000 m (janela de 10000 m e índice estrutural 0)

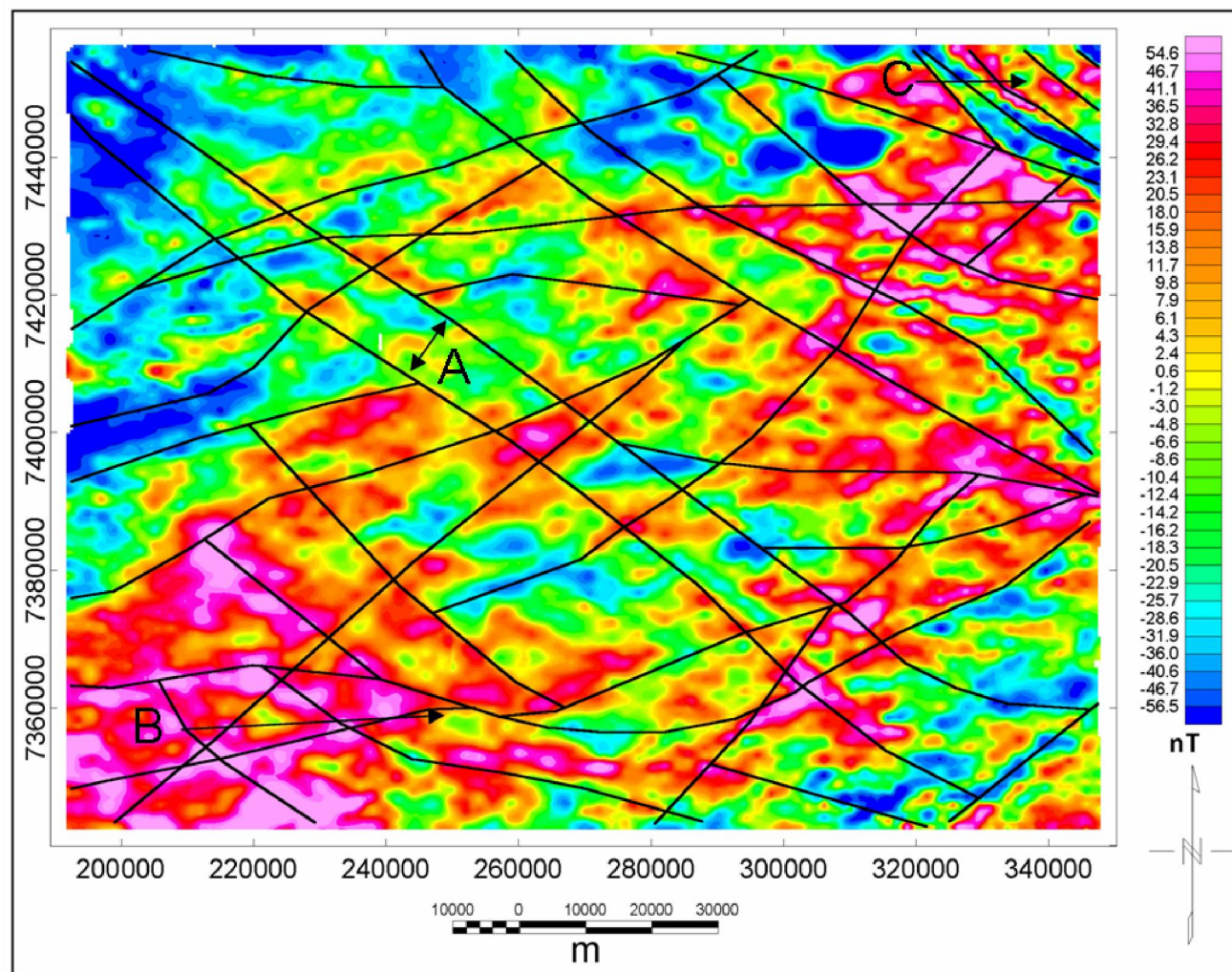


### 6.3. Arcabouço magnético-estrutural

A interpretação qualitativa integrada dos mapas magnéticos decorrentes das diferentes técnicas de processamento, nos quatro níveis de investigação, resultou em um mapa de alinhamentos magnéticos representativo das estruturas (falhas/fraturas) dos basaltos da Formação Serra Geral, exibido na Figura 46, sobreposto ao mapa magnético residual. Uma vez que a abordagem de investigação é regional, somente são representados neste mapa os alinhamentos magnéticos mais contínuos e consistentes.



Figura 46 - Arcabouço magnético-estrutural do embasamento da Bacia Bauru na área de estudo sobreposto ao mapa magnético residual original – A – Zona de Falha Candido de Abreu – Campo Mourão; B – Lineamento de São Sebastião; C – Falha do Rio Alonzo



## 7 Análise estrutural de superfície

Visando a elaboração de um modelo estrutural da superfície do terreno foram traçados os alinhamentos identificados no MNT, imagens Landsat 7 e Rede de drenagem.

O modelo gerado para este nível de investigação serviu de base para comparação com o arcabouço magnético-estrutural já definido, visando correlacionar as estruturas da superfície do Grupo Caiuá e do seu embasamento.

### 7.1. Modelo numérico do terreno (MNT)

Foi utilizado neste trabalho o modelo numérico do terreno (MNT) proveniente do projeto SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), da USGS (*United States Geological Survey*), derivado de levantamento realizado pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e NGA (*National Geospatial-Intelligence Agency*), através de sensor instalado no ônibus espacial *Endavour*, entre os dias 11 e 22 de fevereiro de 2000.

O modelo numérico do terreno, construído a partir de células quadradas de 90 metros de lado, foi sobreposto às imagens Landsat 7 com o objetivo de traçar os alinhamentos estruturais da área de estudo.

A Figura 47 mostra a representação do relevo sombreado do MNT, com pseudoiluminação de 315°, mostrando, na porção norte da área, o vale do rio Ivaí, com alinhamento E-W, e, na porção noroeste, com tendência segundo a direção NNE-SSW, a calha do rio Paraná.

### 7.2. Imagens Landsat 7 – Sensor ETM+

As cenas 223/76 e 223/77, geradas pelo sensor Landsat 7 e adquiridas em 08/07/2003, são compostas por nove bandas espectrais, e foram analisadas na forma de composições RGB variadas. Os melhores resultados foram obtidos utilizando as composições R1G2B3 (Figura 48), R5G4B3, R1G5B7 e R4G7B2, as quais evidenciaram com maior nitidez as estruturas da

área. É possível notar que a imagem exibida na Figura 48 não contempla a mesma área envolvida pela aeromagnetometria e pelo MNT, em função da disponibilidade de dados.

A interpretação dos alinhamentos extraídos do MNT e das cenas Landsat 7 é mostrada na Figura 49. Posteriormente, este arcabouço foi comparado com aquele obtido pela análise morfoestrutural da rede de drenagem, com o intuito de gerar um único modelo do arcabouço estrutural superficial da região.



Figura 47 - Relevo sombreado do modelo numérico do terreno, pseudo-iluminado na direção 315°

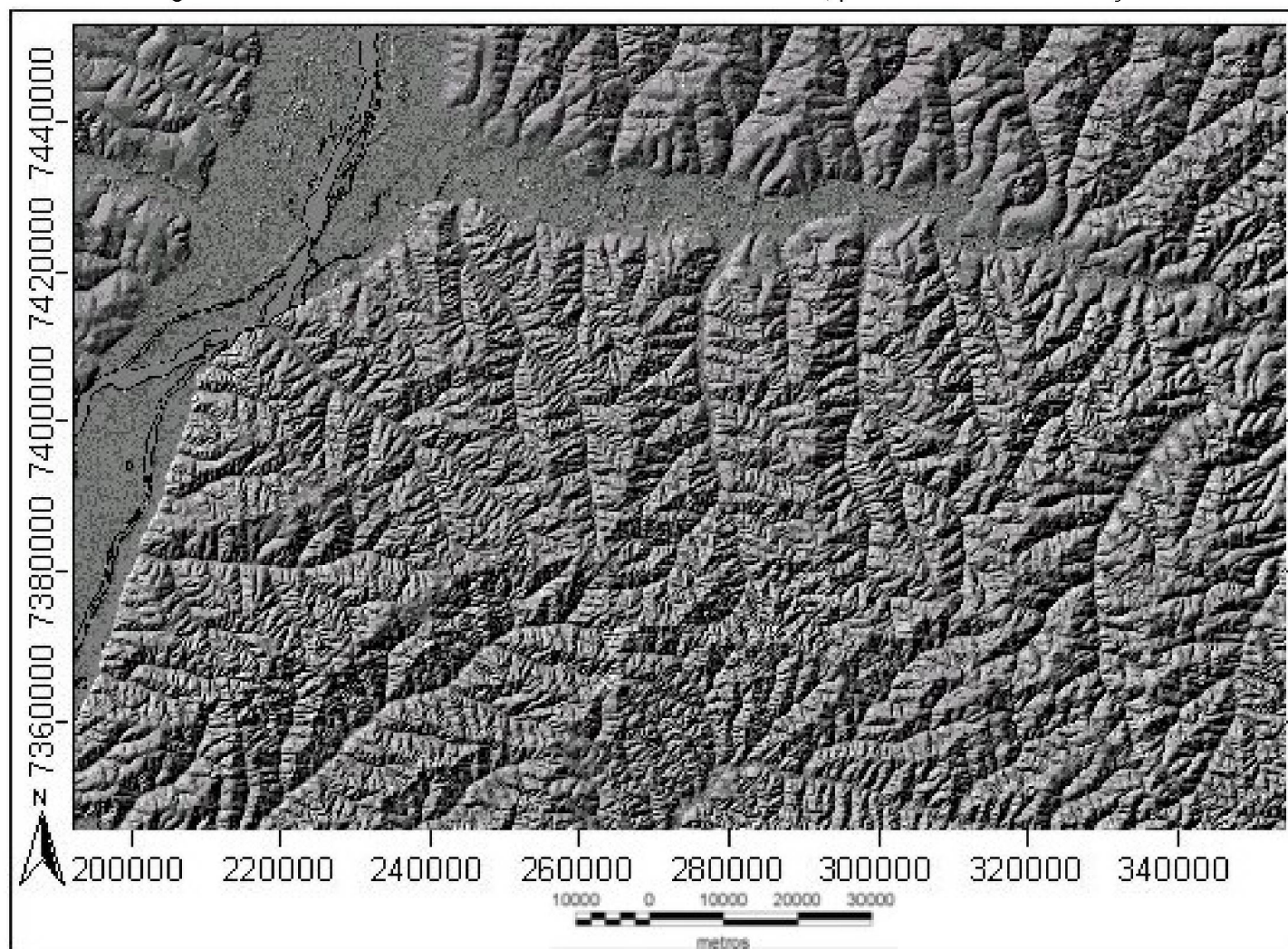




Figura 48 - Imagem Landsat 7, cenas 223/76 e 223/77, composição R1G2B3

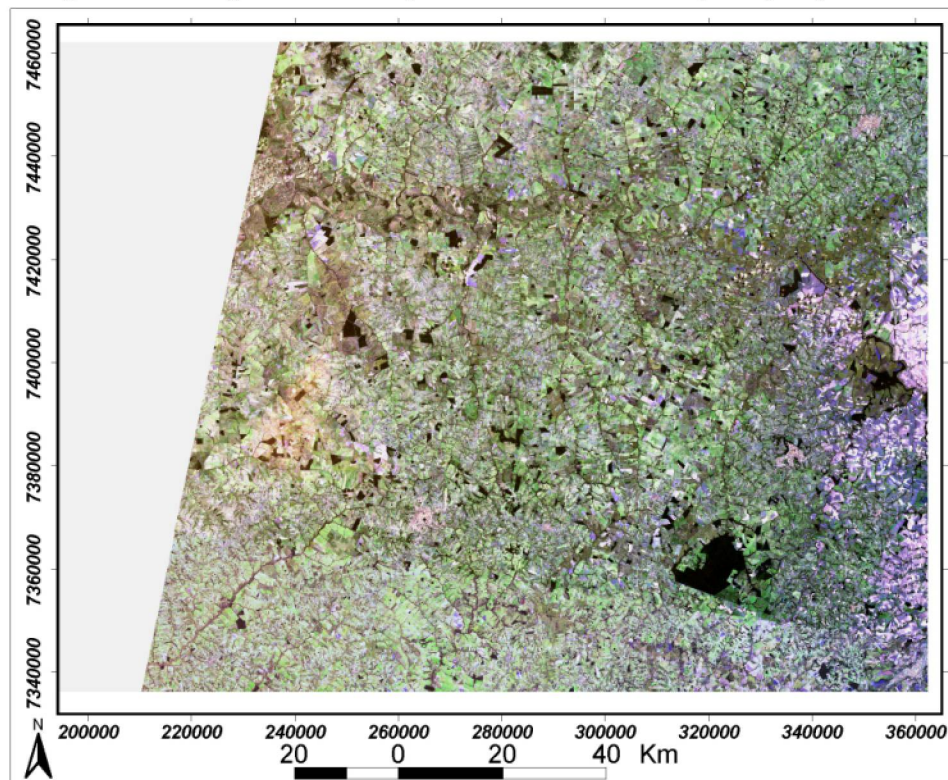
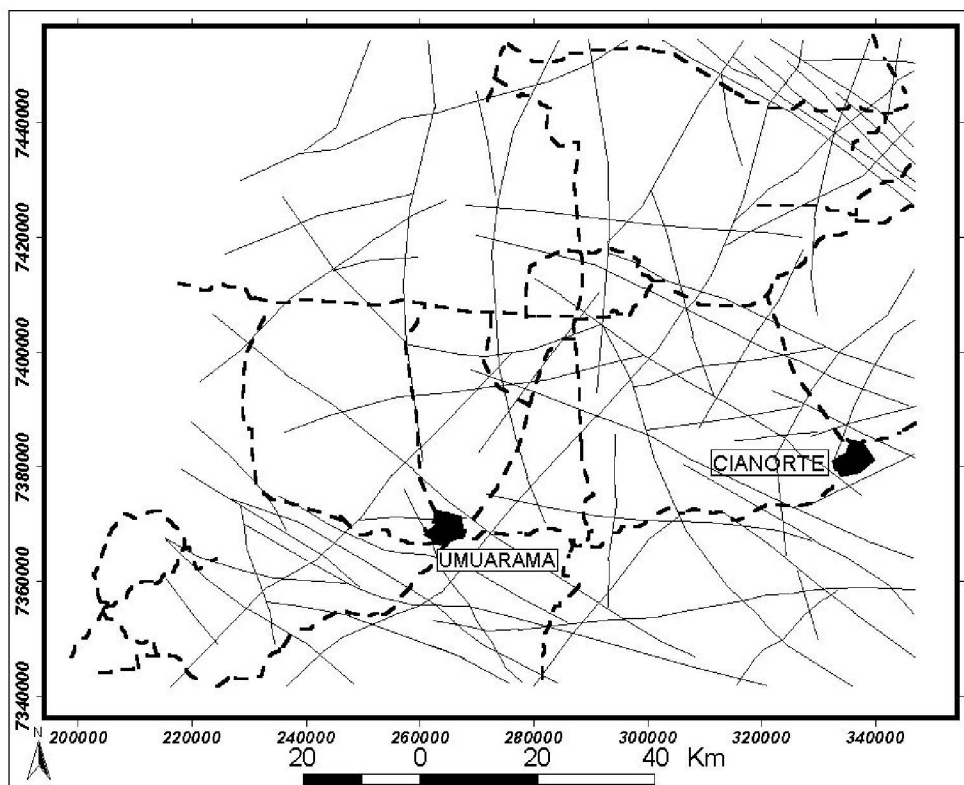


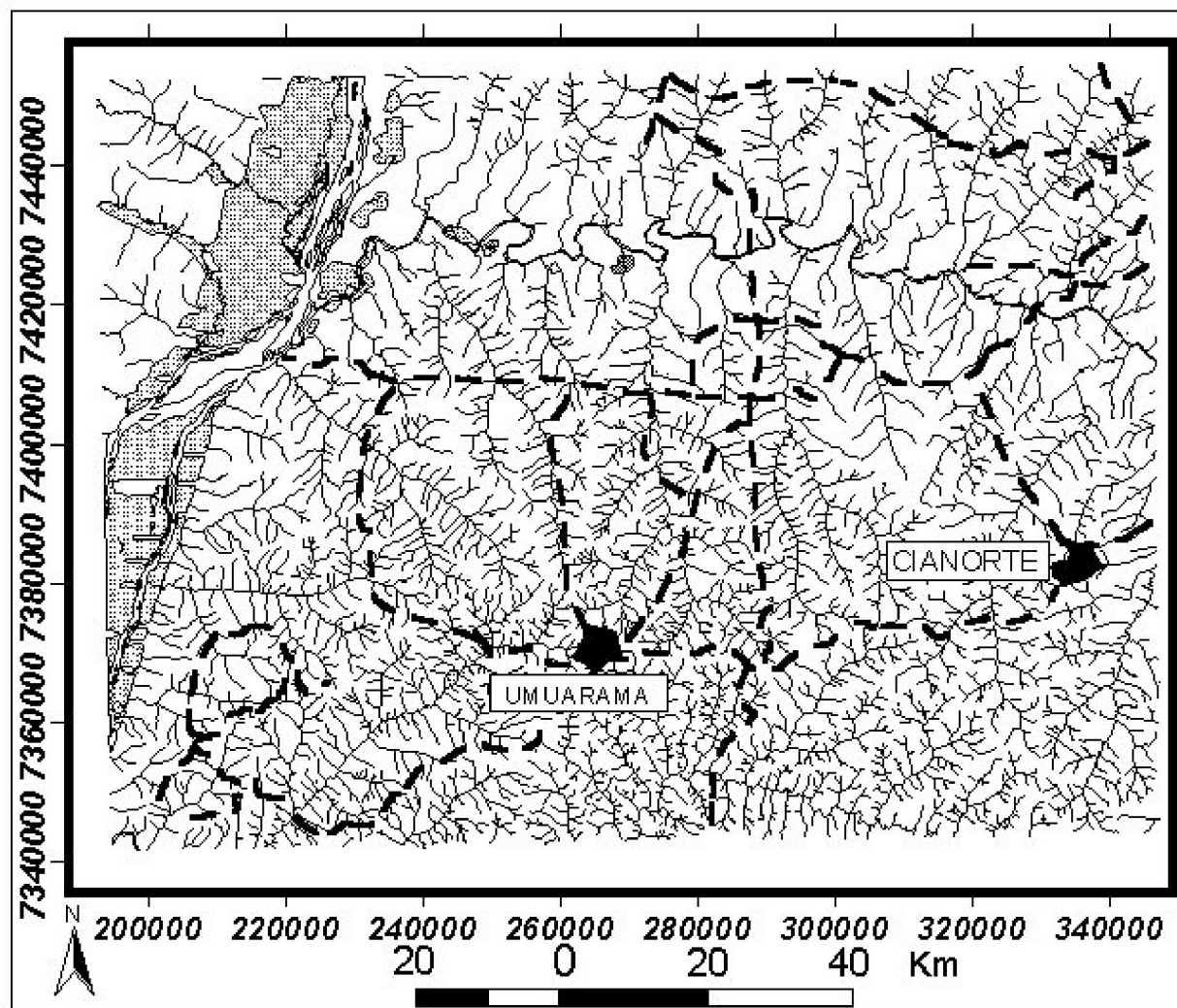
Figura 49 - Alinhamentos estruturais extraídos da integração entre o MNT e a imagem Landsat



### **7.3. *Análise morfoestrutural da rede de drenagem***

A rede de drenagem da folha Umuarama, na escala 1:250.000, elaborada pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, IBGE, 1978), serviu de carta para a análise morfoestrutural. Através da sobreposição desta base ao MNT, a rede de drenagem foi complementada (Figura 50), algumas vezes em até duas ordens de grandeza.

Figura 50 - Rede de drenagem da área de estudo



Sobre a rede de drenagens da Figura 50 foi realizada a análise morfoestrutural, baseada nas sistemáticas descritas por Soares e Fiori (1976) e Lima (2002). A análise consistiu na identificação de anomalias de drenagens, como assimetrias de vertentes, feições circulares (linhas vermelhas) e lineares radiais (linhas azuis), estrangulamentos e capturas de rios. A identificação destas feições conduziu a elaboração de um mapa morfoestrutural (Figura 51), bem como do mapa de alinhamentos de drenagem, mostrado na Figura 52.

Figura 51 - Interpretação morfoestrutural da rede de drenagem

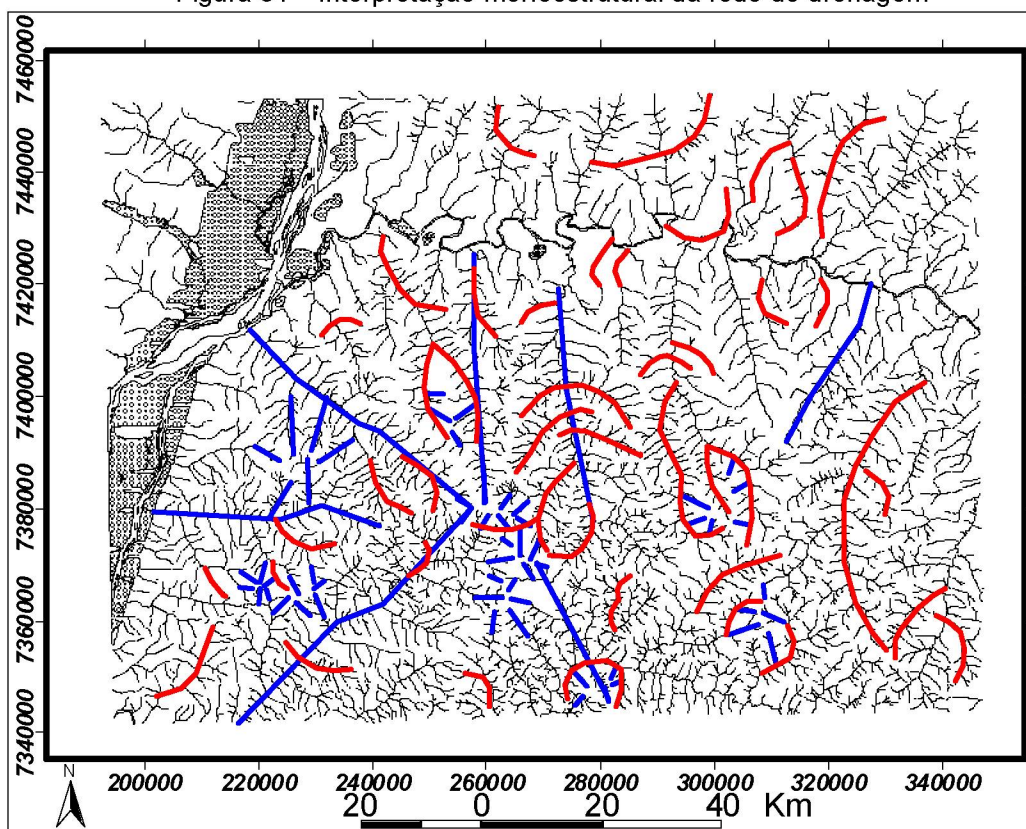
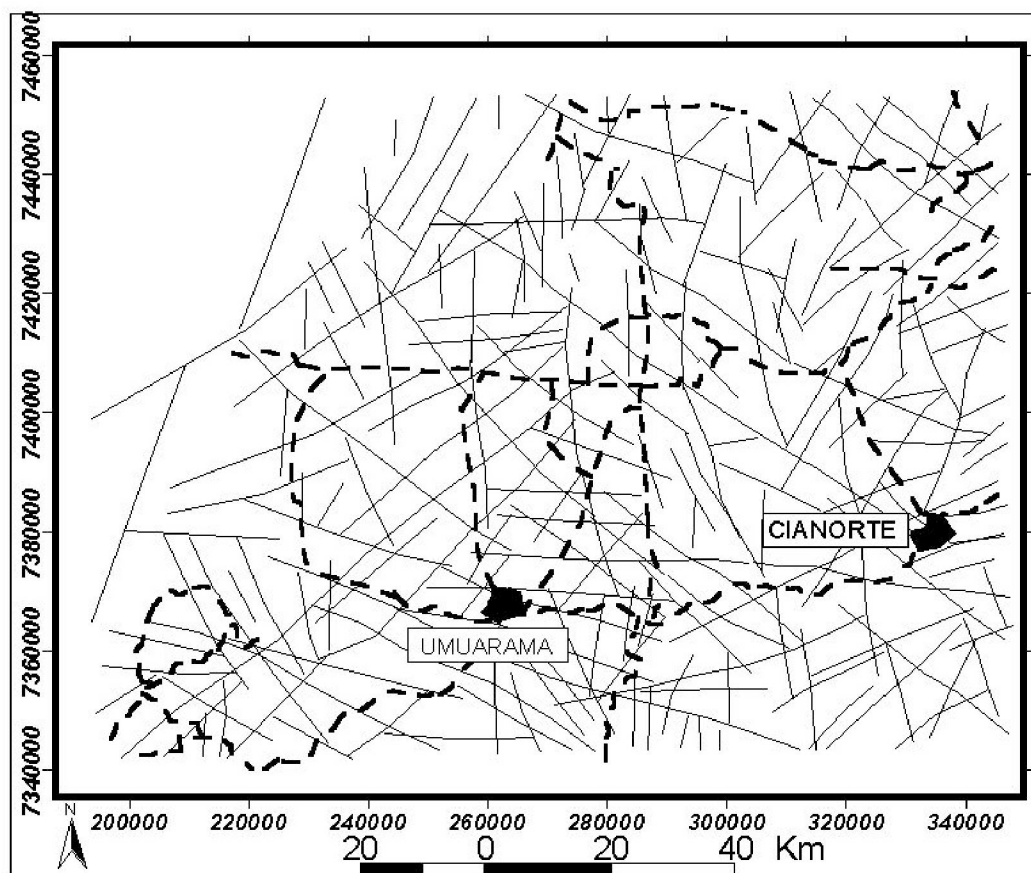


Figura 52 - Alinhamentos de drenagem



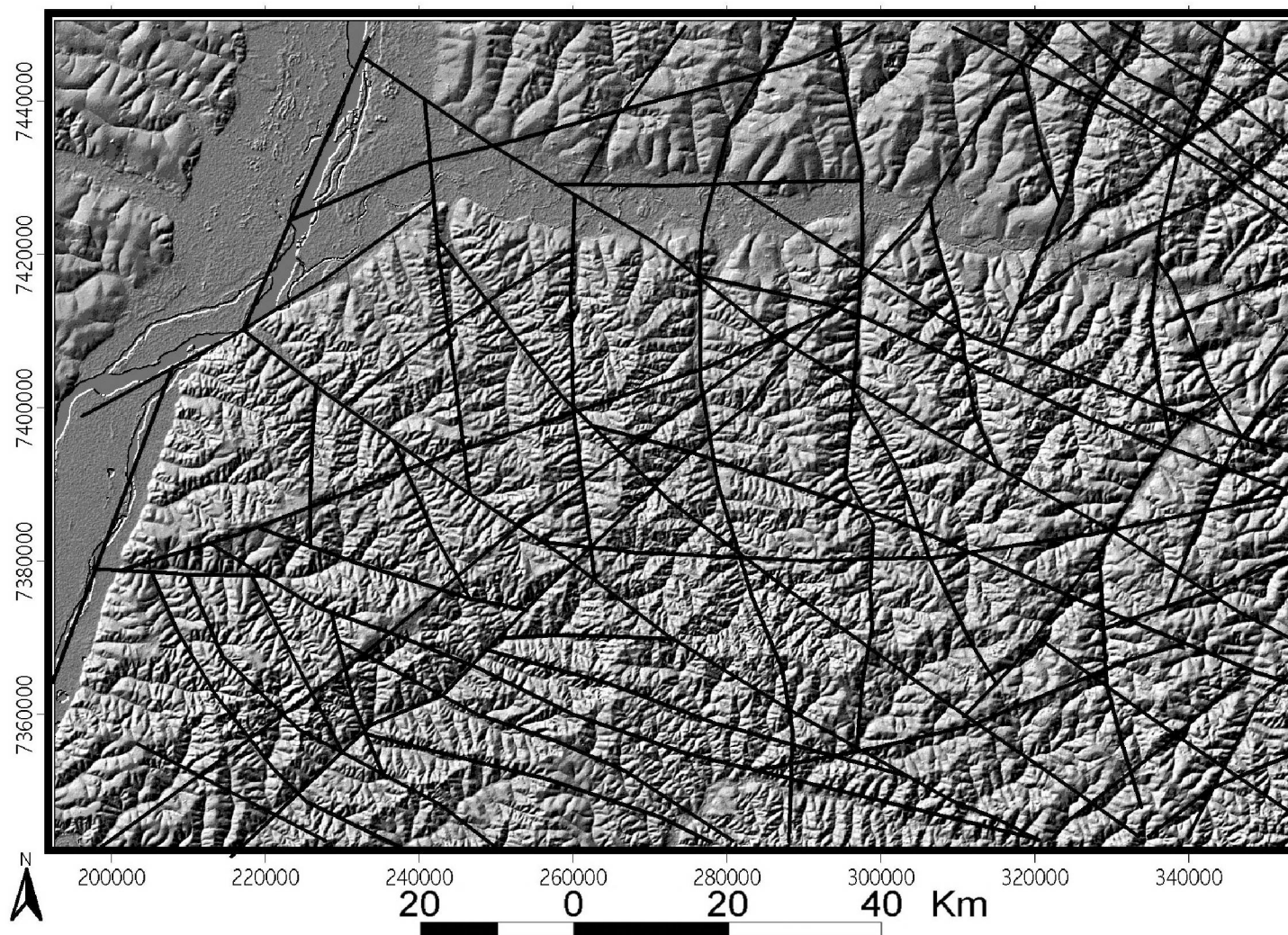
#### **7.4. Arcabouço estrutural aflorante**

Os resultados obtidos nas análises estruturais da superfície do Grupo Caiuá foram confrontados visualmente em ambiente SIG (Sistema de Informações Geográficas), resultando no mapa do arcabouço estrutural aflorante da região, exibido na Figura 53, sobreposto ao MNT.

Nota-se neste mapa a correspondência dos principais alinhamentos estruturais deste nível de investigação com as grandes feições de relevo do modelo numérico do terreno.



Figura 53 - Arcabouço estrutural aflorante na região sobreposto ao MNT, pseudo-iluminado na direção N45°



## **8 Análise integrada dos alinhamentos**

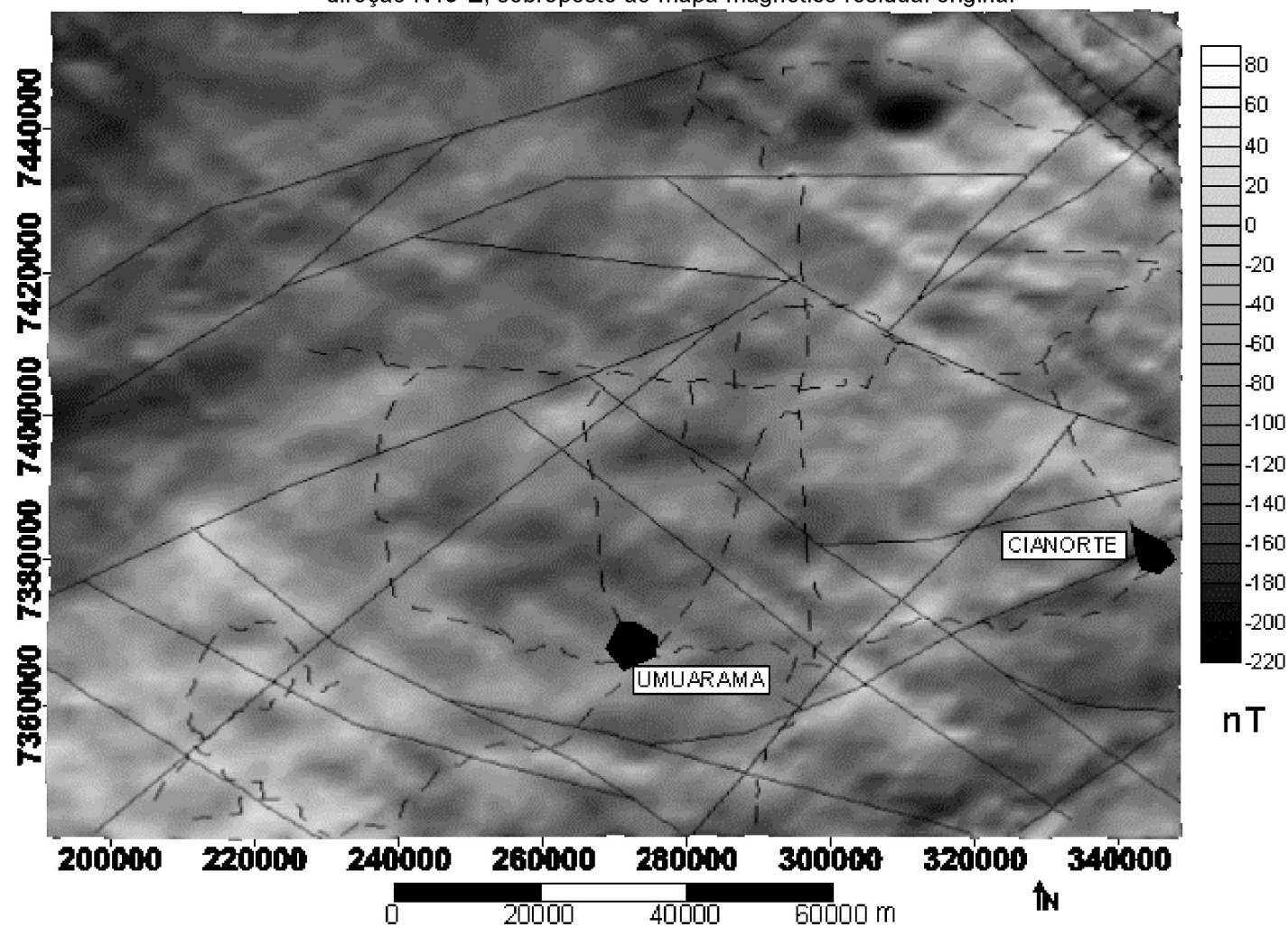
### **8.1. *Arcabouço estrutural comum***

O mapa síntese do processamento geofísico, exibido na Figura 46, foi confrontado visualmente, em ambiente SIG, com o mapa dos alinhamentos da superfície do Grupo Caiuá (Figura 53). O objetivo desta comparação foi identificar a correlação entre as estruturas dos dois níveis de investigação, utilizando como critérios básicos a superposição espacial e a continuidade dos alinhamentos.

O arcabouço magnético-estrutural comum aos dois níveis de investigação mencionados é mostrado na Figura 54, sobreposto ao mapa magnético residual original. Este mapa reflete as principais estruturas regionais identificadas tanto nos basaltos da Formação Serra Geral (embasamento da Bacia Bauru), quanto na superfície dos arenitos do Grupo Caiuá.



Figura 54 - Arcabouço estrutural comum a superfície do Grupo Caiuá e ao seu embasamento, pseudo-iluminado na direção N45°E, sobreposto ao mapa magnético residual original

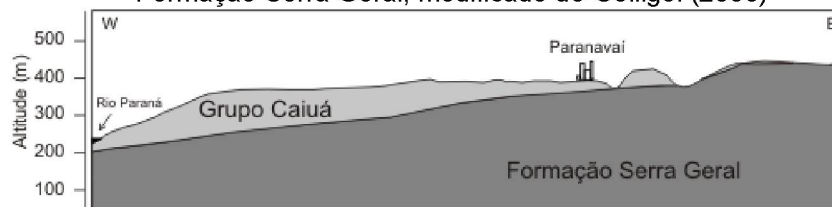


## 9 Contexto hidrogeológico

A composição basicamente arenítica das rochas do Grupo Caiuá no estado do Paraná (Fernandes, 1992), resultou em elevadas porosidades e permeabilidades, permitindo assim a percolação e o armazenamento das águas subterrâneas no Sistema Aquífero Caiuá, o qual foi classificado por Rosa Filho (1982) como granular, do tipo livre a semiconfinado. Este sistema aquífero é amplamente utilizado para o abastecimento regional (Sanepar, 2002; Suderhsa, 2002), tanto público como privado, através de poços produtores com profundidades variáveis entre 30 m, na porção leste (próximo ao contato com a Formação Serra Geral), e 230 m, no trato oeste, com média de 103 m.

Sob as rochas do Grupo Caiuá, os basaltos da Formação Serra Geral também são ótimos produtores de água. Nestas rochas a água circula e é acumulada ao longo de fraturas, ou zonas de fraturas, e também em níveis amigdaloidais localizados nas porções superiores dos derrames. Tais características permitem classificar o Sistema Aquífero Serra Geral como do tipo fissural (fraturado) e, pelo menos em sua porção superior, pode ser considerado como aquífero livre em conjunto com o Sistema Aquífero Caiuá (Celligoi, 2000). A Figura 55 apresenta um perfil E-W esquemático na região de Paranavaí, mostrando as relações de contato entre o Grupo Caiuá e a Formação Serra Geral, desde a borda dos arenitos, a leste, até a calha do rio Paraná, a oeste.

Figura 55 - Perfil esquemático mostrando as relações de contato entre o Grupo Caiuá e a Formação Serra Geral, modificado de Celligoi (2000)

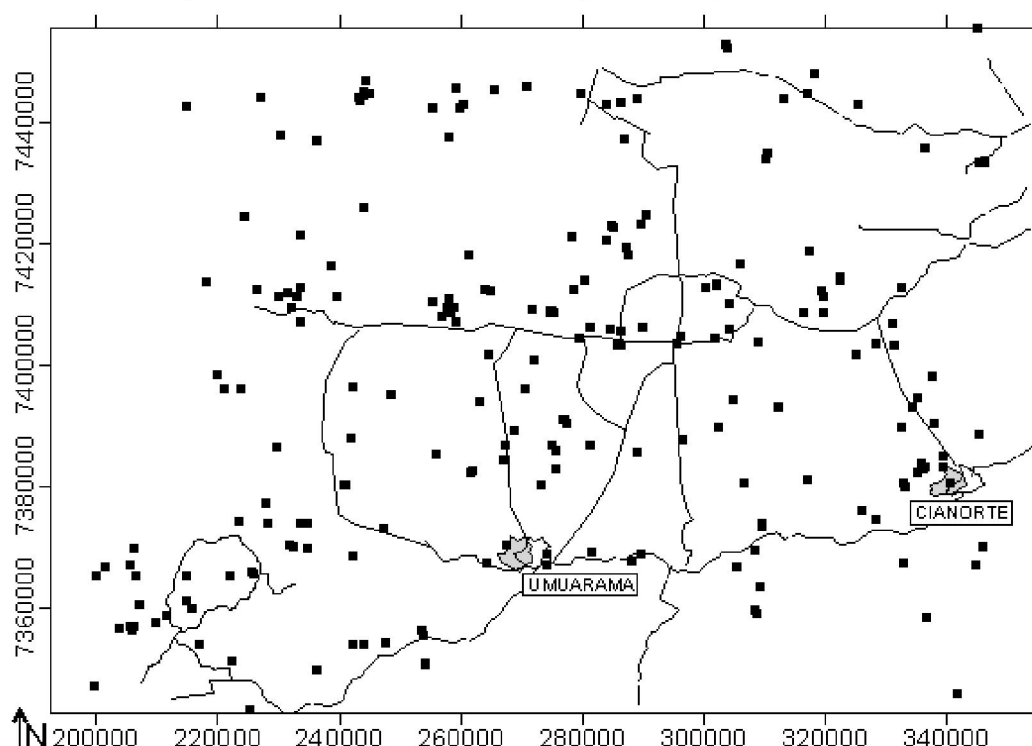


Através dos bancos de dados fornecidos pela Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar) e pela Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e de Saneamento Ambiental (Suderhsa), foram selecionados 222 poços tubulares produtores, completados

nos arenitos do Grupo Caiuá (localizados na Figura 56), através dos quais foram analisadas as seguintes variáveis hidrogeológicas: potenciometria, vazão, capacidade específica, potencial hidrogeniônico (pH), sólidos totais dissolvidos (STD). Do total de poços considerados, somente 46 alcançaram índices satisfatórios de balanço iônico, com erros inferiores a 10%, permitindo avaliar a distribuição espacial das variáveis hidroquímicas (cátions maiores). A localização destes últimos poços é exibida no mapa ternário da Figura 69.

A análise das variáveis hidrogeológicas e hidroquímicas foi realizada de *per se*, através da geração de mapas de contorno, os quais foram comparados com o arcabouço estrutural comum, mostrado na Figura 54, e com as curvas de isópacas do Grupo Caiuá (Fernandes 1992).

Figura 56 - Posicionamento dos poços contemplados neste estudo

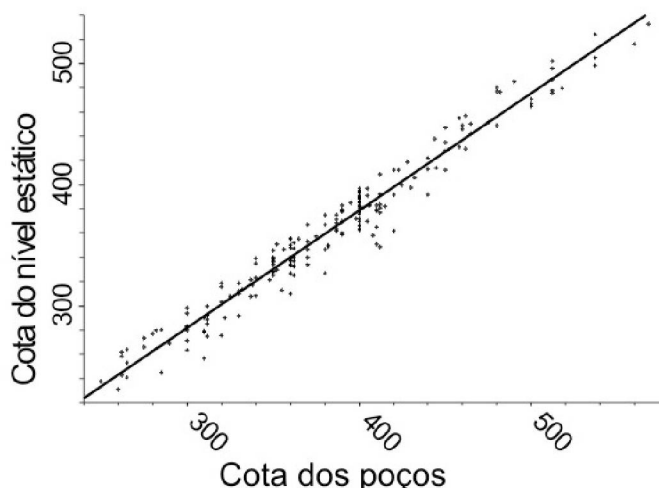


### 9.1. Potenciometria

Os dados do nível estático, medidos em cada um dos poços, foram interpolados através de krigagem com tendência externa do modelo numérico do terreno (MNT), visando gerar um mapa da superfície potenciométrica da região. A escolha do método de interpolação utilizado foi baseada no modelo conceitual, no qual as superfícies topográfica e potenciométrica tendem a

apresentar comportamentos semelhantes. A correlação entre as cotas dos poços e do nível estático, na forma de um diagrama de dispersão, é mostrada na Figura 57, a qual indica um coeficiente de correlação, calculado por regressão linear, de 0,98.

Figura 57 - Diagrama de dispersão entre as cotas dos poços e do nível estático, ambas em metros. Coeficiente de correlação  $R=0,98$



### 9.1.1. Análise Variográfica

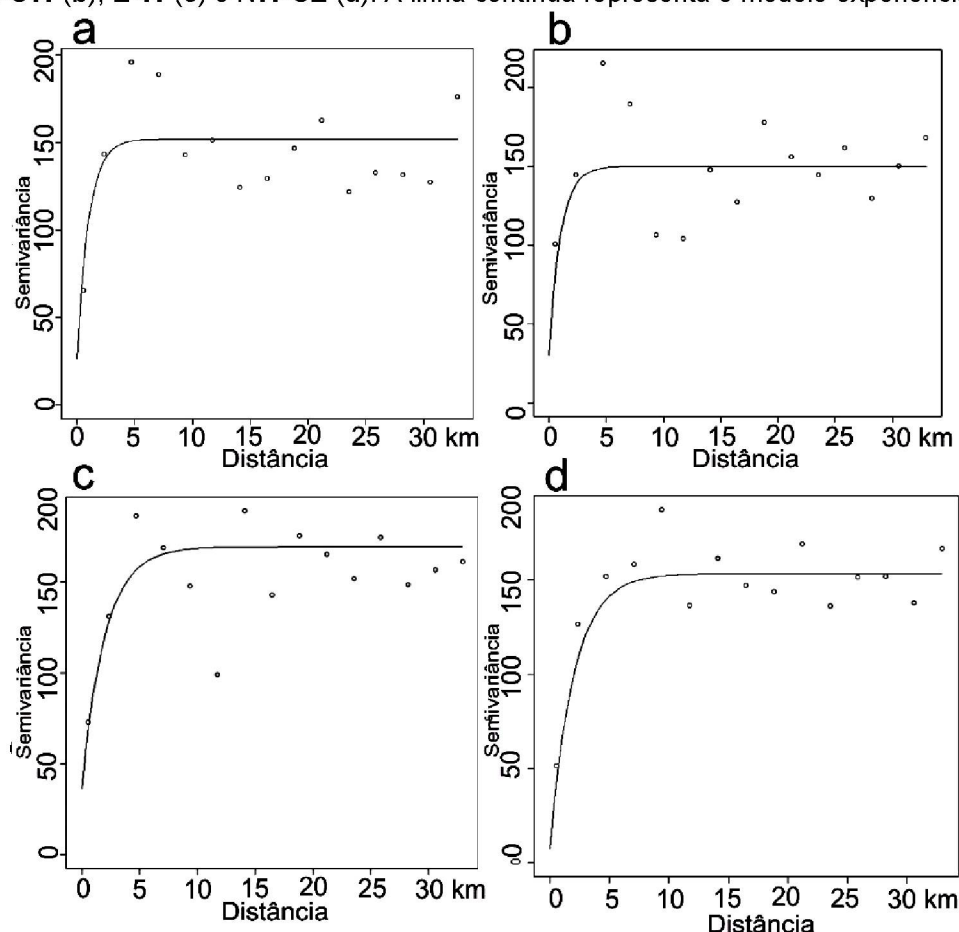
Com base na correlação entre as superfícies do terreno e potenciométrica, foi subtraída dos dados originais a tendência do MNT. Sobre os resíduos da tendência externa realizou-se a análise variográfica, procurando averiguar uma possível correlação espacial entre estas superfícies.

Os variogramas direcionais foram construídos com distância máxima de 33 km, divididos em 15 passos, com distância de 2,2 km entre cada passo. Foi utilizada, em todos os variogramas direcionais, tolerância de 45° para a busca dos valores. Desta forma foram elaborados os variogramas para as direções N-S, NE-SW, E-W e NW-SE, mostrados na Figura 58 (respectivamente: **a**, **b**, **c** e **d**).

O aplicativo R (código aberto) permite ajustar automaticamente o modelo variográfico, desde que lhe sejam fornecidos um modelo básico (gaussiano, exponencial, esférico, etc.) e estimativas para o efeito pepita, alcance e patamar. Em todos os variogramas, o modelo exponencial resultou em melhor ajuste aos dados, conforme indicado na Figura 58.

Com base no modelo variográfico ajustado, foi possível definir uma anisotropia direcional de cerca de duas vezes, com maior alcance na direção E-W (c), aproximadamente com 8 km, e menor na direção N-S (a), em torno de 4 km. Na direção E-W (c) também se verificou a maior variância, com melhor correlação entre os valores na direção NE-SW (Figura 58 – b).

Figura 58 - Variogramas dos resíduos da tendência externa (MNT) segundo as direções N-S (a), NE-SW (b), E-W (c) e NW-SE (d). A linha contínua representa o modelo exponencial ajustado



### 9.1.2. Krigagem anisotrópica com tendência externa

Os dados originais do nível estático foram interpolados através de uma malha regular de 51 linhas por 51 colunas, totalizando 2601 pontos estimados, com dimensões de cada célula de 2215 m x 3040 m, respectivamente representando linhas e colunas.

A krigagem com tendência externa necessita de um requisito básico para ser aplicada: como existe a inclusão de uma covariável, que é utilizada como tendência geral dos dados, é fundamental conhecer também o valor

desta covariável para cada um dos nós da malha a ser interpolada. Neste caso fez-se coincidir as posições dos nós do MNT com os 2601 pontos da malha a ser interpolada, utilizando o método do vizinho mais próximo, já que o MNT envolvido no processo (Figura 47) tem maior resolução, com células de 90 m.

Como a análise variográfica indicou uma anisotropia direcional do modelo exponencial, com maior correlação na direção NE-SW (Figura 58 – **b**), a krigagem foi realizada utilizando uma elipse de busca assimétrica, com raio maior de 30 km na direção NE-SW e menor, com 15 km, na direção NW-SE, fazendo uso dos variogramas direcionais.

O mapa de contorno da malha interpolada é mostrado na Figura 59. Os valores estimados ficaram restritos entre os extremos de 90 e 572 m, com média em 352 m e desvio padrão de 73 m.

### **9.1.3. Validação Cruzada**

Como forma de avaliar quantitativamente os resultados da krigagem foi utilizado o procedimento da validação cruzada, disponível no pacote geoR (aplicativo R). Este procedimento, realizado durante a krigagem, estima o valor da variável em questão (neste caso o nível estático) para as mesmas posições dos pontos fornecidos como base, comparando posteriormente o valor estimado com o valor real, medido em campo. Foram realizadas estimações para todos os 222 poços utilizados neste estudo.

O diagrama de dispersão, construído para comparar os valores medidos e estimados, é mostrado na Figura 60, cujo coeficiente de correlação entre eles, calculado por regressão linear, foi também 0,98, mostrando que as estimativas realizadas aproximaram-se bastante dos valores reais da superfície potenciométrica, nos pontos considerados.

Figura 59 - Mapa de contorno da superfície potenciométrica, construído através de krigagem com tendência externa do MNT

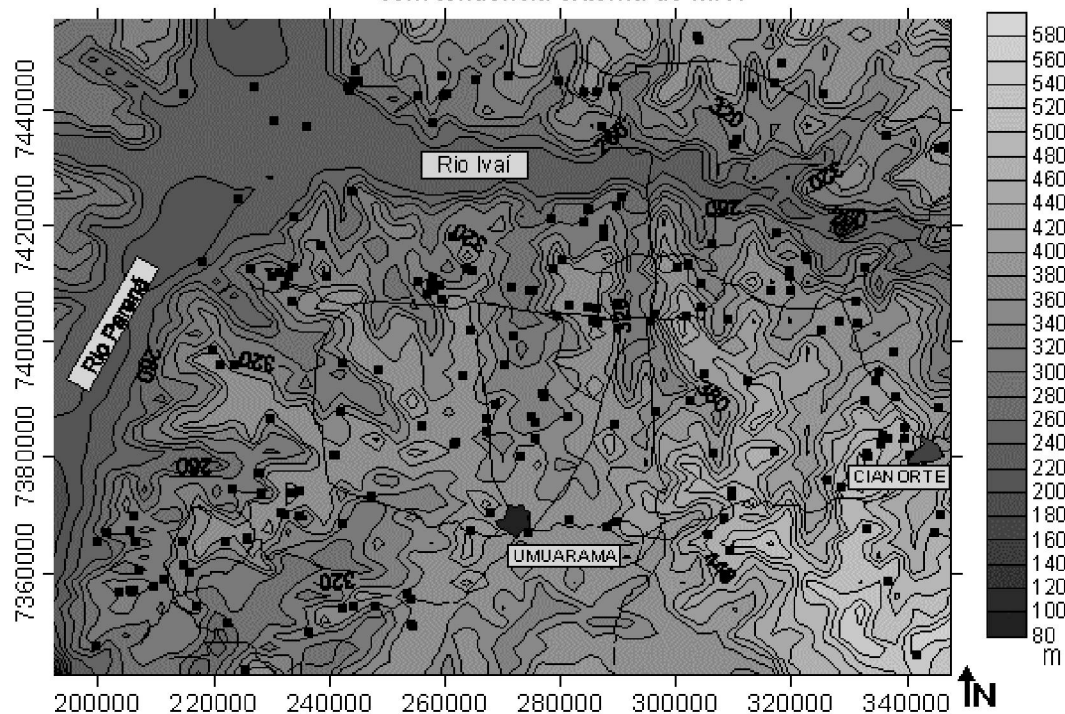
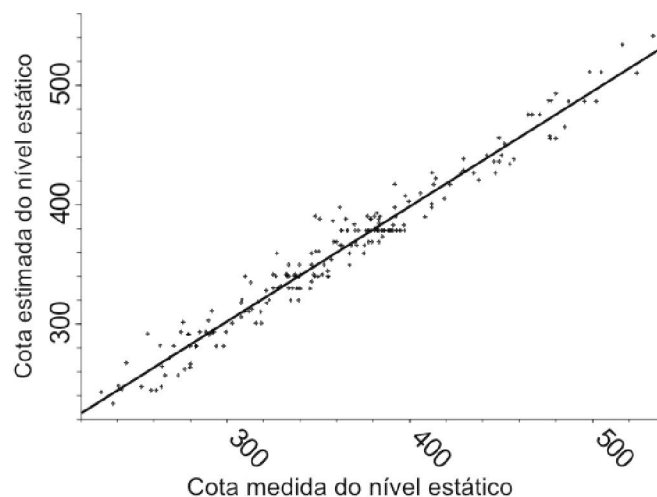


Figura 60 - Diagrama de dispersão entre os valores medidos e estimados (pela krigagem com tendência externa) do nível estático, ambos em metros. Coeficiente de correlação  $R=0,98$



Também é possível avaliar o resultado qualitativo da krigagem através da análise morfológica do mapa de contorno da superfície potenciométrica (Figura 59), o qual mostra semelhança com o MNT (Figura 47), como sugerem os modelos conceituais. As estatísticas destas duas malhas regulares (potenciometria e MNT) são comparadas na Tabela 2.



**Tabela 2 -** Comparação estatística entre as malhas do MNT e da superfície potenciométrica (valores em metros)

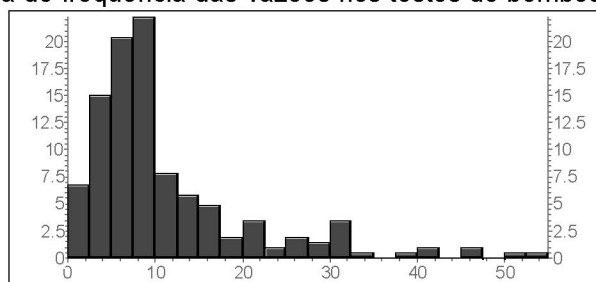
	MNT	Superfície potenciométrica
Valor mínimo	213	90
Média	352	330
Valor máximo	637	572
Desvio padrão	86	73

## 9.2. Vazão

As bases utilizadas (Sanepar, 2002; Suderhsa, 2002) envolvem dados de testes de bombeamento, realizados no ato da perfuração dos poços, incluindo vazão máxima, tempo de duração do teste, nível dinâmico, além da vazão de outorga (cadastrada na Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental – Suderhsa). Como a vazão de exploração (outorga) é fortemente influenciada pelo perfil construtivo, como função do diâmetro do poço e área dos filtros, além das condições intrínsecas à rocha reservatório, optou-se neste trabalho em utilizar a vazão obtida nos testes de bombeamento, balizada pela estabilização do nível dinâmico. As estatísticas dos valores das vazões, em  $\text{m}^3/\text{h}$ , são exibidos na Tabela 3. A distribuição dos dados é mostrada no histograma de frequência da Figura 61, com classes de  $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$ , onde é possível observar que, apesar da média dos valores ser de  $11,08 \text{ m}^3/\text{h}$ , vários poços alcançaram vazões de maior magnitude.

**Tabela 3 -** Estatísticas dos dados originais de vazão, em  $\text{m}^3/\text{h}$ 

Valor mínimo	0,20
Média	11,08
Valor máximo	52,80
Desvio padrão	9,41

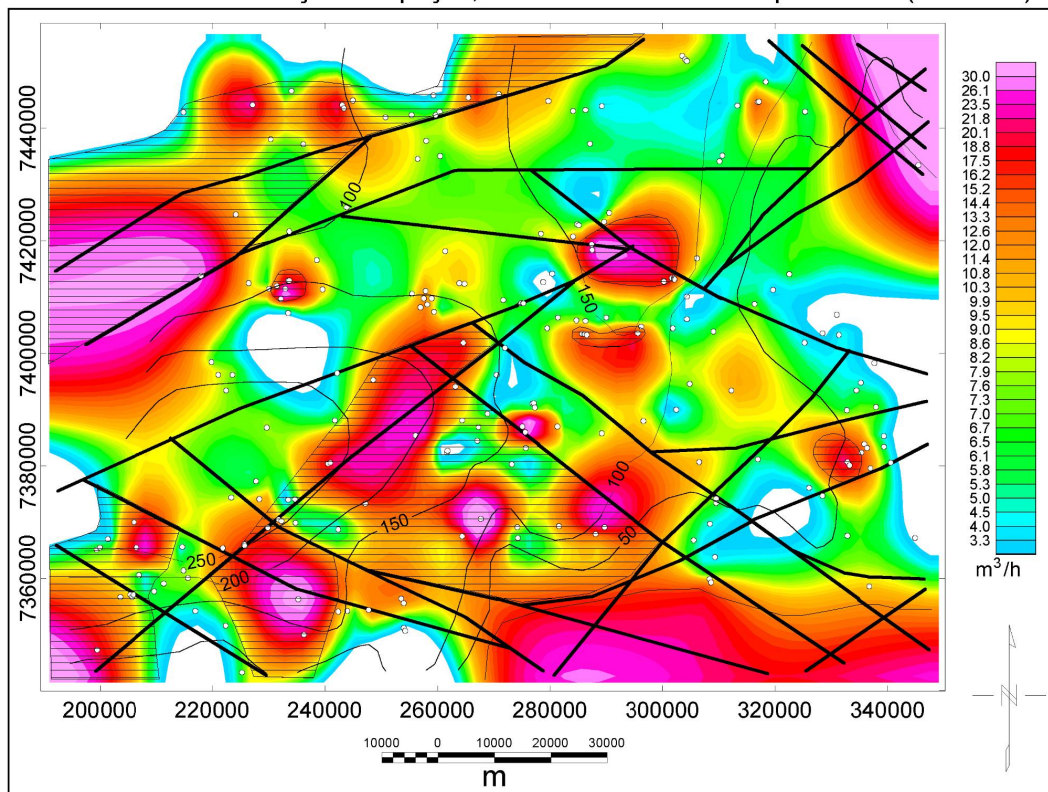
Figura 61 - Histograma de frequência das vazões nos testes de bombeamento, classes de 2,5 m<sup>3</sup>/h

Os dados de vazão foram interpolados através do algoritmo da curvatura mínima, utilizando células de 3100 m x 2260 m, resultando no mapa de contorno da Figura 62. Por limitações impostas pelo método de interpolação, algumas células resultaram em valores negativos para esta variável, o que naturalmente é impossível, já que a vazão mínima, para o caso de um poço seco, é zero. Por esta razão optou-se por eliminar do mapa de contorno estes valores, resultando nas áreas em branco, localizadas principalmente na periferia da área. O mesmo efeito acontece com os altos valores obtidos nas bordas do mapa, devendo-se atentar para o posicionamento dos poços (pontos brancos) ao realizar a análise deste produto.

Foram também identificadas áreas de altas vazões, marcadas na Figura 62 como zonas hachuradas. Também são exibidos no mesmo mapa as isópacas (linhas finas) do Grupo Caiuá e o arcabouço estrutural comum entre a superfície e o seu embasamento.

Conforme constatou Rosa Filho (1982), ao avaliar os testes de bombeamento de 42 poços do Sistema Aquífero Caiuá no estado do Paraná, a diminuição granulométrica nos arenitos permite, às vezes, que o sistema funcione como aquífero, reduzindo a transmissividade da rocha reservatório. Tal característica confere ao aquífero, em escala local, certo grau de semiconfinamento, porém, regionalmente, o sistema apresenta comportamento livre, uma vez que a continuidade lateral das camadas semiconfinantes (aquítardos) não é muito expressiva.

Figura 62 - Mapa de vazão, incluindo o arcabouço estrutural comum, as isópacas do Grupo Caiuá e a localização dos poços, exibindo as zonas mais produtivas (hachuras)



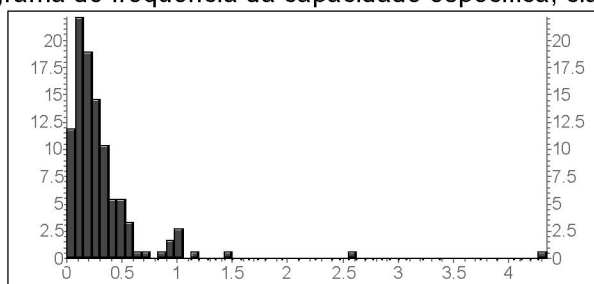
### 9.3. Capacidade específica

Uma forma de quantificar a capacidade de fornecimento de água de um determinado poço, frente ao rebaixamento do nível dinâmico causado pela exploração, é realizar o cálculo da capacidade específica. Trata-se da razão entre a vazão e o rebaixamento causado pelo bombeamento da água e, como estas duas variáveis possuem respectivamente unidades em  $\text{m}^3/\text{h}$  e m, o resultado do cálculo é uma estimativa da vazão (em  $\text{m}^3/\text{h}$ ) por metro de rebaixamento do nível dinâmico. A Tabela 4 mostra as estatísticas dos dados originais de capacidade específica, enquanto a Figura 63 exibe o histograma de frequência construído com os mesmos dados, utilizando classes de 0,075 ( $\text{m}^3/\text{h}$ )/m. É evidente que a maioria dos valores estão localizados abaixo de 0,5 ( $\text{m}^3/\text{h}$ )/m, refletindo baixas vazões por metro de rebaixamento do nível dinâmico.

**Tabela 4 - Estatísticas dos dados originais de capacidade específica, em (m<sup>3</sup>/h)/m**

Valor mínimo	0,003
Média	0,310
Valor máximo	4,280
Desvio padrão	0,410

**Figura 63 - Histograma de frequência da capacidade específica, classes de 0,075 (m<sup>3</sup>/h)/m**



A Figura 64 mostra o resultado da interpolação dos valores da capacidade específica, utilizando o algoritmo da curvatura mínima, com células de 3100 m x 2260 m. Como descrito anteriormente, tal método gerou valores negativos para algumas células, os quais foram omitidos do mapa (áreas em branco). Na mesma figura são assinalados o arcabouço estrutural comum aos dois níveis de investigação, bem como as isópacas do Grupo Caiuá, localização dos poços estudados e zonas (hachuradas) de maior capacidade específica.

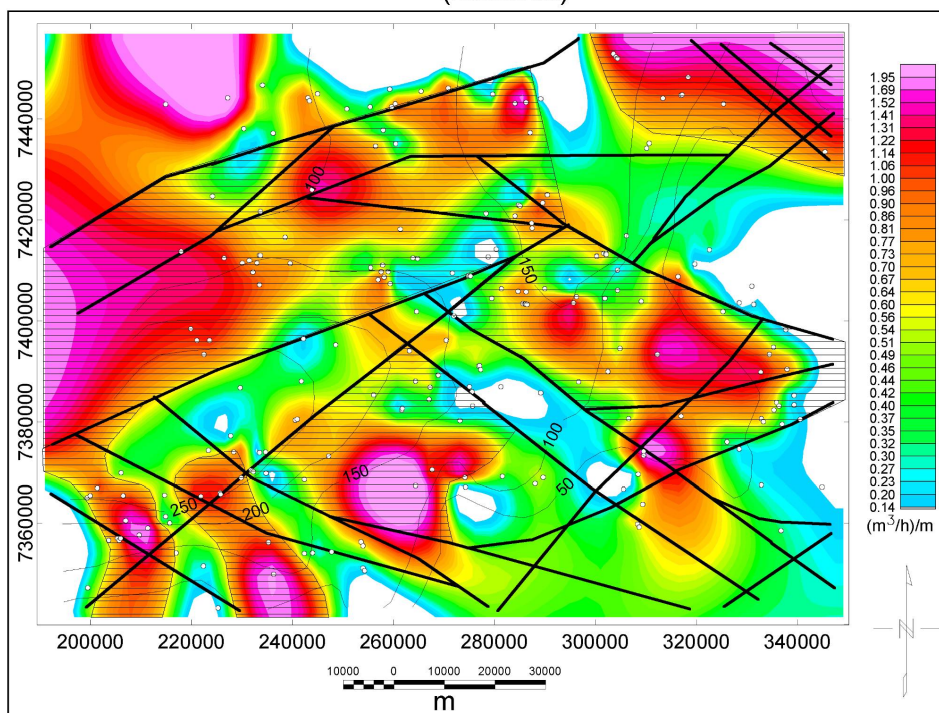
#### **9.4. Sólidos totais dissolvidos – STD**

Os teores de sólidos totais dissolvidos possuem relação direta com a composição mineralógica das rochas-reservatório e com o tempo de percolação/residência das águas subterrâneas no interior do sistema.

Celligoi (2000), estudando todo o Sistema Aquífero Caiuá no estado do Paraná, comparou os teores de STD, em média 75,4 mg/L, com o teor médio do Sistema Aquífero Serra Geral, de 212,0 mg/L. Esta característica é decorrente da recarga do primeiro sistema, que ocorre de forma direta (pouco tempo de residência), em função das rochas apresentarem grande permeabilidade. Outro fator que implica em baixos índices de STD é a

composição das rochas do Grupo Caiuá na região, onde predominam fácies areníticas quartzosas, com quantidades menores de feldspatos (microclínio) e argilominerais. Ambos os minerais são os principais responsáveis pelo quimismo das águas subterrâneas, uma vez que o quartzo é insolúvel nas condições normais de temperatura e pressão do aquífero.

Figura 64 - Mapa de capacidade específica, incluindo o arcabouço estrutural comum, as isópacas do Grupo Caiuá e a localização dos poços, exibindo as zonas mais produtivas (hachuras)

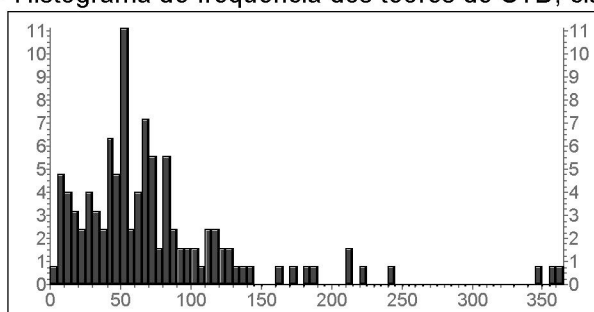


As estatísticas dos valores de STD são mostradas na Tabela 5, com índices enquadrados no padrão de potabilidade recomendado pela Organização Mundial da Saúde (OMS, 1998), cujo limite máximo permissível é de 1000 mg/L, compatíveis com os valores calculados por Celligoi (2000). O histograma de frequência dos teores de STD é exibido na Figura 65, com classes de 5 mg/L, onde podem ser visualizados teores anômalos, alcançando valores acima de 200 mg/L, possivelmente indicando amostras de água do Sistema Aquífero Caiuá com contribuições provenientes do Sistema Aquífero Serra Geral.



**Tabela 5 - Estatísticas dos dados originais de STD, em mg/L**

Valor mínimo	4,00
Média	75,36
Valor máximo	361,80
Desvio padrão	64,45

**Figura 65 - Histograma de frequência dos teores de STD, classes de 5 mg/L**

O mapa dos teores de STD foi interpolado utilizando o algoritmo da curvatura mínima e apresentou a mesma limitação imposta aos dados da vazão, gerando valores negativos, os quais foram omitidos no mapa da Figura 66. Nesta ilustração também são indicadas as isópacas do Grupo Caiuá, o arcabouço estrutural comum aos dois níveis de investigação e o posicionamento dos poços utilizados na interpolação. As zonas hachuradas refletem os blocos com teores mais elevados de STD.

### **9.5. Potencial hidrogeniônico – pH**

O potencial hidrogeniônico mede a concentração de íons  $H^+$  na água. O balanço entre os íons hidrogênio ( $H^+$ ) e hidróxido ( $OH^-$ ) determina o grau de acidez/basicidade da água. Nas águas quimicamente puras os íons  $H^+$  estão em equilíbrio com os íons  $OH^-$ , do que decorre a neutralidade do pH.

Interpretações realizadas com base nas medidas de pH merecem atenção especial, uma vez que tais determinações são passíveis de variações em função da temperatura, pressão e do tempo decorrido entre a coleta das amostras e as análises laboratoriais.

As estatísticas dos dados de pH utilizados neste trabalho variam bastante (entre 4,23 e 8,6) e são exibidas na Tabela 6.

Figura 66 - Mapa de teores de STD, incluindo o arcabouço estrutural comum, as isópacas do Grupo Caiuá e a localização dos poços, exibindo as zonas com maiores teores (hachuras)

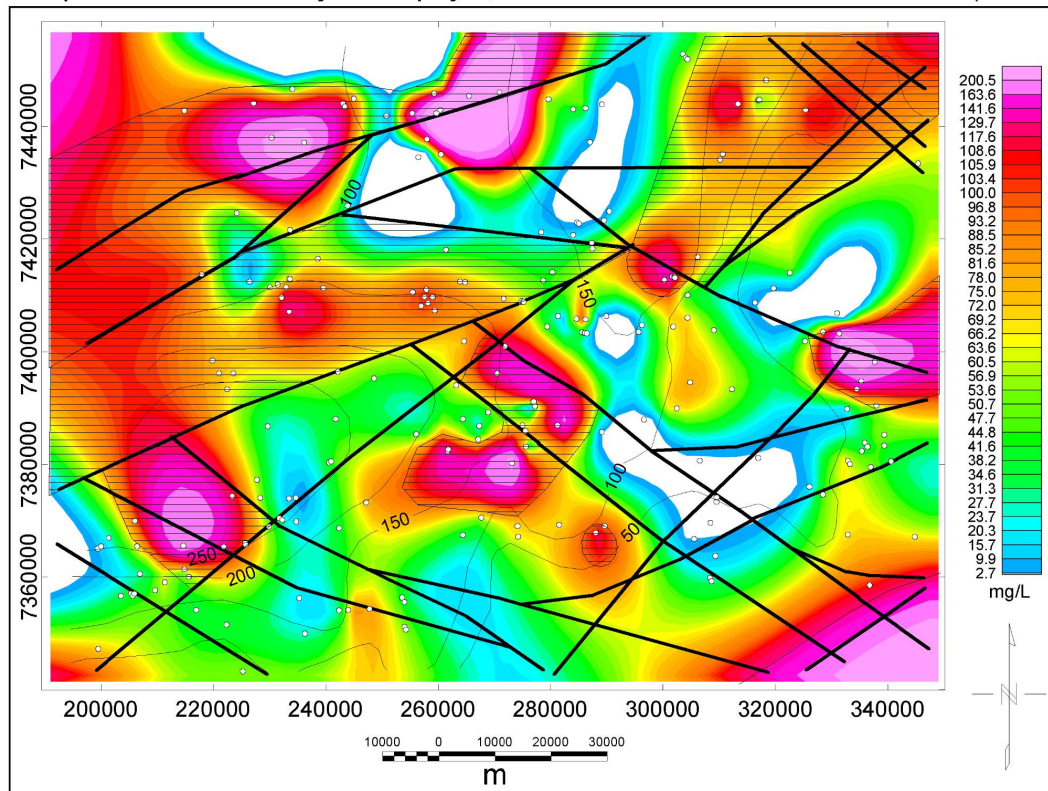
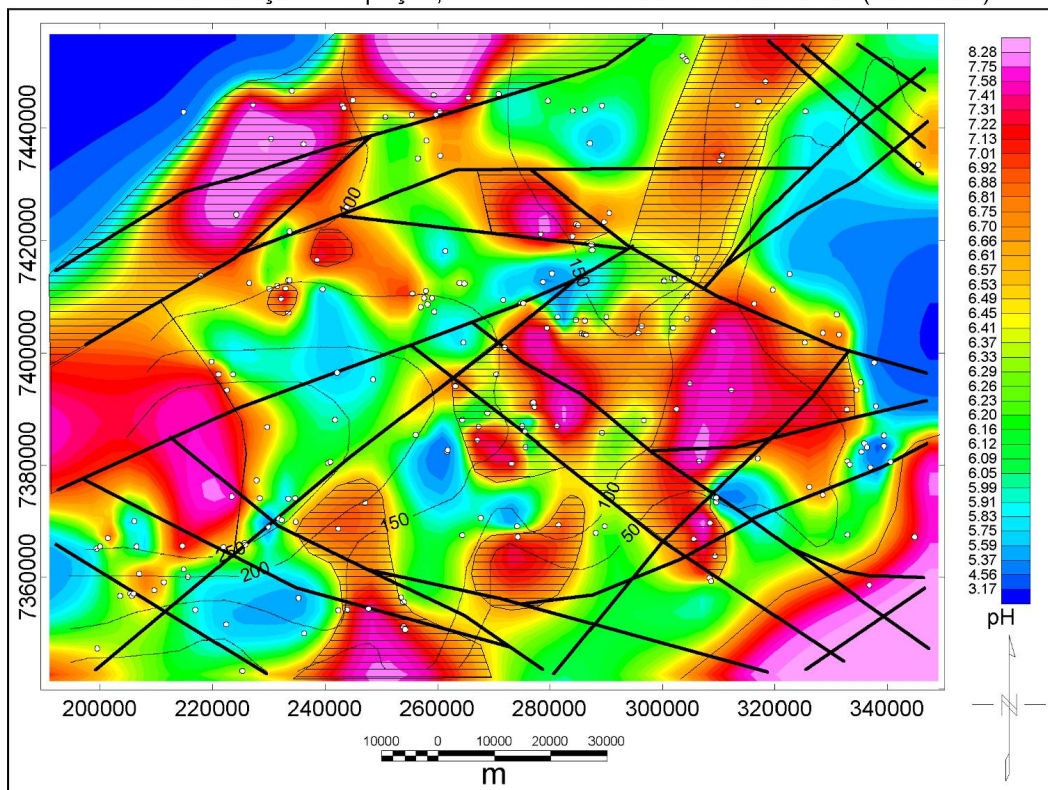


Tabela 6 - Estatísticas dos dados originais de pH

Valor mínimo	4,23
Média	6,48
Valor máximo	8,60
Desvio padrão	0,69

O mapa da Figura 67 mostra o resultado da interpolação dos valores do pH, também através do algoritmo da curvatura mínima, mostrando as zonas mais elevadas na forma de blocos hachurados. Da mesma maneira que nos mapas anteriores, são assinaladas as isópacas do Grupo Caiuá, o arcabouço estrutural comum aos dois níveis de investigação e o posicionamento dos poços utilizados.

Figura 67 - Mapa do pH, incluindo o arcabouço estrutural comum, as isópacas do Grupo Caiuá e a localização dos poços, exibindo os blocos mais elevadas (hachuras)



### 9.6. Hidroquímica

A análise hidroquímica visou quantificar e espacializar o conteúdo catiônico das amostras coletadas em poços produtores completados no Sistema Aquífero Caiuá. Os dados utilizados (Celligoi 2000), 46 amostras que contemplaram o limite de 10% de erro de balanço iônico, foram tratados através da seguinte equação:

$$[(\text{cátions} - \text{ânions}) / (\text{cátions} + \text{ânions})] \times 100$$

Os resultados do balanço iônico são mostrados na Tabela 7.

A classificação hidroquímica foi baseada, na área de estudo, no conteúdo dos quatro cátions maiores das águas naturais:  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Na}^{+}$ ,  $\text{K}^{+}$  e  $\text{Mg}^{++}$ . Os teores destes elementos dissolvidos na água mostram diferenças num mesmo aquífero e/ou em sistemas aquíferos distintos.

**Tabela 7 - Resultados do balanço iônico**

Número de amostras	46
Erro mínimo	0,7 %
Média	1,72 %
Erro máximo	8,6 %
Desvio padrão	1,15

Segundo Rosa Filho *et al.* (1987) as águas típicas do Sistema Aquífero Serra Geral são classificadas como bicarbonatadas cálcicas, com teores elevados de  $\text{Ca}^{++}$ , provenientes da solubilização da calcita, enquanto os teores de  $\text{Na}^+$  e  $\text{Mg}^{++}$  decorrem da solubilização dos feldspatos (plagioclásios) e dos piroxênios, respectivamente. A solubilidade da calcita, em consequência dos teores de  $\text{Ca}^{++}$ , diminui em função do aumento de temperatura da água.

A homogeneidade litológica do Grupo Caiuá na área de estudo, reflete-se na composição mineralógica do sistema aquífero homônimo, formado basicamente por quartzo, feldspatos potássicos (microclínio) e argilominerais, principalmente caolinita (Rosa Filho *et al.*, 1987). Uma vez que os argilominerais estão presentes em pequenas quantidades e que o quartzo é insolúvel em condições normais de temperatura e pressão no meio natural, as águas deste sistema aquífero tornam-se enriquecidas em  $\text{K}^+$ , provenientes da solubilização dos feldspatos potássicos (microclínio).

Por possuir carga iônica sensivelmente reduzida, as águas do Sistema Aquífero Caiuá são mais diluídas que aquelas do Sistema Aquífero Serra Geral. Esta característica torna as águas do aquífero granular altamente susceptíveis à contaminação proveniente de águas com maior conteúdo iônico. Assim, por menor que seja a quantidade de cátions ( $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ), proveniente dos basaltos da Formação Serra Geral e que entrem em contato com as águas armazenadas nos arenitos do Grupo Caiuá, através de fraturas e em condições potenciométricas favoráveis, rapidamente ocorre a contaminação das águas do sistema granular pelo aquífero fraturado, sotoposto. Desta forma, as águas predominantemente bicarbonatadas potássicas, típicas do aquífero

Caiuá, são mescladas com águas dos basaltos (bicarbonatadas cálcicas), através de diversas taxas de mistura. Sobre esta característica, Rosa Filho *et al.* (1987) ressaltam: “(as águas dos arenitos) por serem mais diluídas que as águas dos basaltos, são por estas últimas um tanto mascaradas quando misturadas”.

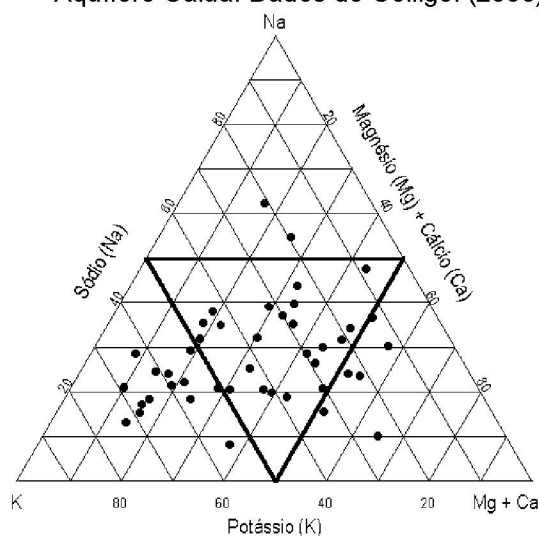
Com o objetivo de identificar misturas de águas entre os dois sistemas aquíferos na área estudada, foi construído um diagrama parcial de Piper modificado, referente aos cátions das 46 amostras analisadas. Conforme descrito em Rosa Filho *et al.* (1987) e corroborado por A. V. L. Bittencourt (comunicação verbal), tal modificação do diagrama de Piper, originalmente com  $Mg^{++}$ ,  $Ca^{++}$  e  $Na^{+}+K^{+}$  em seus vértices superior, esquerdo e direito, respectivamente, consistiu na substituição, dos mencionados vértices, na mesma ordem, pelos cátions  $Na^{+}$ ,  $K^{+}$  e  $Mg^{++}+Ca^{++}$ . A opção de desvincular, no diagrama de Piper modificado, os cátions  $Na^{+}$  e  $K^{+}$ , visou realçar as características hidroquímicas que discriminam os dois sistemas aquíferos em questão, principalmente o isolamento do  $K^{+}$ , típico das águas do Sistema Aquífero Caiuá.

A Figura 68 exhibe o diagrama modificado de Piper, construído com base nos dados de Celligoi (2000), referentes aos poços completados exclusivamente no Sistema Aquífero Caiuá. Neste diagrama, apenas 14 amostras revelam características hidroquímicas das águas dos arenitos, localizadas próximo ao vértice do  $K^{+}$ , enquanto as demais denotam contaminação pelas águas dos basaltos da Formação Serra Geral, através da contribuição dos demais cátions analisados ( $Na^{+}$  e  $Mg^{++}+Ca^{++}$ ).

Visando avaliar a distribuição espacial dos cátions, em correspondência ao arcabouço estrutural proposto, foi construído um mapa de composição ternária RGB (Figura 69), seguindo o mesmo padrão do diagrama de Piper modificado, construídos com células de 5000 m e elipse de busca de 12000 m, com base na fusão de mapas representativos de cada um dos vértices. A utilização da elipse de busca serviu para reduzir a inferência da interpolação, realizada pelo algoritmo da curvatura mínima, uma vez que a ausência de dados num raio de 12000 m não é representada no mapa ternário.



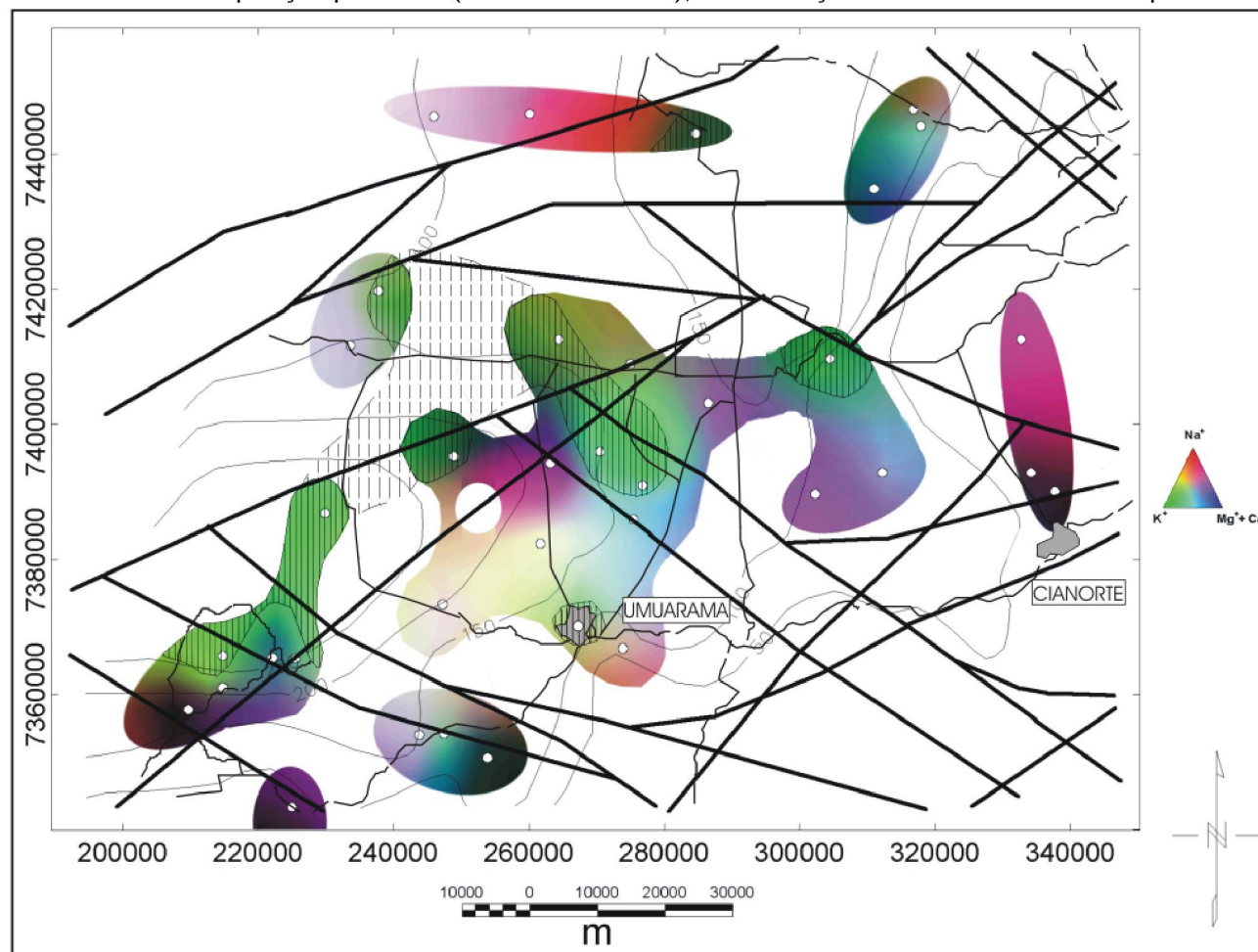
Figura 68 - Diagrama modificado de Piper referente aos poços completados no Sistema Aquífero Caiuá. Dados de Celligoi (2000)



No mapa da Figura 69, os vértices vermelho (R - *red*), verde (G - *green*) e azul (B - *blue*) representam, respectivamente,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{Mg}^{++} + \text{Ca}^{++}$ . Tal ilustração também exibe o arcabouço estrutural comum aos dois sistemas aquíferos, bem como as isópacas do Grupo Caiuá (Fernandes 1992). As porções do mapa que apresentam cor predominante verde, marcada por linhas verticais contínuas, indicam águas com características hidroquímicas exclusivas do Sistema Aquífero Caiuá, enquanto que as demais combinações de cores, refletidas principalmente pelos tons azul, violeta e rosa, são interpretadas como decorrentes de diferentes taxas de mistura das águas dos sistemas aquíferos considerados.

A porção hachurada (linhas tracejadas) no mapa da Figura 69, refere-se a uma inferência entre os principais núcleos de composição potássica, localizados na porção centro-oeste da área. É perceptível também a correspondência entre estes núcleos ricos em  $\text{K}^+$  e as maiores espessuras do Grupo Caiuá.

Figura 69 - Mapa de composição ternária  $R(\text{Na}^+)-G(\text{K}^+)-B(\text{Mg}^{++} + \text{Ca}^{++})$  dos poços completados no Sistema Aquífero Caiuá, indicando as áreas de composição potássica (zonas hachuradas), o arcabouço estrutural comum e as isópacas do Grupo Caiuá



## 10 Discussão dos resultados

### 10.1. Geofísica

Condições geológicas favoráveis à aplicação do método magnetométrico, principalmente a presença de um embasamento fortemente magnético sobreposto por sedimentos areníticos inertes ao campo terrestre, permitiram a interpretação estrutural dos basaltos da Formação Serra Geral no noroeste do estado do Paraná, mesmo encobertos. Estimativas de profundidades das fontes geofísicas, realizadas através da deconvolução de Euler, revelaram que as estruturas investigadas ultrapassaram em muito os cerca de 270 metros de espessura dos sedimentos da Bacia Bauru na área investigada.

A aquisição dos dados aeromagnéticos, mesmo a uma altura de vôo de 450 metros, encerra anomalias de alta frequência espacial, dificultando uma interpretação em escala regional. Desta forma, a utilização de filtros de continuação ascendente, simulando aquisições dos dados nas alturas de 1000, 2000 e 4000 m, mostrou-se eficaz na suavização das anomalias e na conseqüente investigação de estruturas regionais cada vez mais profundas.

Comparativamente, os produtos decorrentes da aplicação dos mencionados filtros, principalmente o de continuação ascendente para 4000 m (Figura 19), mostrou boa correspondência com os resultados do filtro passa-baixa, indicados na Figura 14, a qual exhibe somente os comprimentos de onda maiores que 25000 m. Os resultados destes dois filtros refletem as estruturas profundas mais importantes da região.

A interpretação, qualitativa e quantitativa, dos quatro níveis de investigação, proporcionou verificar a penetratividade e a consistência das estruturas identificadas no interior da Bacia do Paraná na área de estudo.

Estimativas de profundidades das estruturas causadoras das anomalias magnéticas, obtidas pela aplicação da deconvolução de Euler nos diversos níveis de investigação, revelaram uma maior concentração entre 600 e 2000 metros. Tais estimativas resultaram da utilização de índices estruturais

correspondentes aos modelos geológicos esperados para a região, como contato magnético e dique/soleira.

Qualitativamente, a análise geofísica proporcionou a identificação de feixes de alinhamentos magnético-estruturais nas direções NW-SE, NE-SW e E-W, compatíveis com as principais estruturas da Bacia do Paraná (Ferreira 1982a,b; Zalán *et al.*, 1987, Soares, 1991). Muitas destas feições segmentam completamente a área de estudo, principalmente aquelas de direção NW-SE, preenchidas por diques de dolerito, responsáveis pelo extravasamento das rochas basálticas da Formação Serra Geral.

Dentre as estruturas da área três já haviam sido identificadas por Ferreira (1982a,b) e Zalán *et al.* (1987). Com direção NW-SE, cortando o extremo nordeste da área, tem-se o Alinhamento do Rio Alonzo; com a mesma direção, segmentando a área em sua porção central localiza-se a Zona de Falha Cândido de Abreu–Campo Mourão; assim como na porção sul, com direção próxima a E-W, tem-se o Lineamento de São Sebastião. As estruturas com direção NE-SW e E-W são menos contínuas, freqüentemente segmentadas por estruturas de direção NW-SE, que exibem maior continuidade, conforme pode ser visualizado na Figura 46.

## **10.2. Análise estrutural de superfície**

A análise dos alinhamentos estruturais superficiais da Bacia Bauru, centrada na interpretação de imagens Landsat 7, modelo numérico de terreno (MNT) e na rede de drenagem, revelou a complexa trama de estruturas da área de estudo.

As inúmeras composições realizadas entre as nove bandas espectrais da imagem Landsat 7 e o MNT, cuja interpretação é indicada na Figura 49, mostra diversas estruturas organizadas em feixes, principalmente nas direções NW-SE, NE-SW e E-W, além de uma estruturação N-S persistente por toda a área.

Três feixes importantes de direção NW-SE são bem definidos, um posicionado sobre o Alinhamento do Rio Alonzo, outro sobre a Zona de Falha Cândido de Abreu–Campo Mourão e o último no extremo sudoeste da região.

Na direção NE-SW foi identificado um feixe de estruturas que corta toda a área, passando pela porção central e, aparentemente, cruzando as demais feições.

Na direção E-W os alinhamentos são mais segmentados, porém foi possível delimitar duas zonas: uma na porção sul da área, posicionada sobre o Lineamento de São Sebastião, e, no centro-norte, outra com menor expressão no terreno e traços mais segmentados. As estruturas de direção N-S, aparentemente, não se apresentam controladas por zonas localizadas, distribuídas em toda a área.

A análise dos alinhamentos de drenagem (Figura 52), revelou estruturas tectônicas suprabasálticas com direções semelhantes àquelas interpretadas sobre as composições entre o MNT e as imagens Landsat. Embora as direções e o posicionamento das estruturas, bem como a correspondência com feições do embasamento da Bacia Bauru (Figura 46) sejam as mesmas, no caso dos alinhamentos de drenagem os traços mostraram-se mais segmentados, alcançando comprimentos menores, porém com maior densidade de traços.

Com base no traçado da rede de drenagem foram identificadas anomalias radiais centrífugas em duas escalas, a maior delas alcançando desde o sul do rio Ivaí até o extremo meridional da área, com cerca de 100 km de diâmetro, além de diversas outras, com diâmetros entre 10 e 20 km. Muitas vezes as feições radiais encontram-se limitadas por anomalias circulares de drenagem, que servem de captura das águas provenientes das drenagens radiais, caracterizando pequenas feições dômicas no terreno. A anomalia radial de maior expressão, previamente identificada por Couto e Silva (1980), foi interpretada por Ferreira *et al.* (1999) como um alto estrutural, denominado informalmente de Domo de Umuarama. Estas estruturas são exibidas na Figura 51, com a cor azul representando as anomalias radiais e a cor vermelha mostrando as anomalias circulares.

A análise integrada dos diversos temas que trataram da análise da superfície dos arenitos do Grupo Caiuá resultou no mapa da Figura 53, onde são exibidos alinhamentos de direção NW-SE, cortando toda a extensão da área, sobrepostos às estruturas já descritas por Ferreira (1982a,b) e Zalán *et al.* (1987). Estruturas de direção NE-SW e E-W mostram-se, com raras exceções, cortadas por outras de direção NW-SE.



### **10.3. Arcabouço estrutural comum**

A superposição dos alinhamentos interpretados com base nos dois níveis de investigação resultou em um mapa representativo das estruturas comuns a cobertura e a seu embasamento, mostrado na Figura 54, sobreposto ao mapa magnético residual. Percebe-se na Figura 54 que as principais estruturas se relacionam com aquelas já descritas por Ferreira (1982a,b) e Zalán *et al.* (1987), como já comentado. A ausência de estruturas de direção N-S no mapa do arcabouço comum chama a atenção, já que estas persistem em todos os temas decorrentes da análise de superfície dos sedimentos do Grupo Caiuá, dispersas por toda a área de estudo, em contraste com os resultados da interpretação geofísica, principalmente em função do posicionamento das linhas de vôo naquela direção e do micronivelamento.

Ocorre, na porção sul da área, uma estrutura semicircular, voltada para norte, com cerca de 120 km de extensão, coincidindo parcialmente com o Lineamento de São Sebastião. Tal estrutura é bem marcada nos mapas geofísicos, representando uma importante feição do embasamento da Bacia Bauru.

### **10.4. Contexto Hidrogeológico**

#### **10.4.1. Potenciometria**

O alto índice de correlação entre os valores do nível estático e da cota altimétrica dos poços, calculado em 0,98 por regressão linear, cujo diagrama de dispersão pode ser visto na Figura 57, tornou possível a interpolação dos dados potenciométricos através da krigagem com tendência externa do MNT. O resultado da interpolação reflete com maior precisão o nível potenciométrico da área de estudo. A aplicação deste método de interpolação se mostrou importante em regiões com carência de dados do nível estático, uma vez que permite a utilização do valor da cota altimétrica para estimar a cota potenciométrica, através do cálculo de correlação entre estas duas variáveis. A eficácia do método foi avaliada através da validação cruzada entre os valores medidos e preditos para os poços da região, cujo diagrama de dispersão é exibido na Figura 60, com coeficiente de correlação calculado em 0,98.

Visualmente, é possível constatar a correspondência morfológica entre o modelo numérico de terreno (Figura 47) e o mapa potenciométrico (Figura 59).

#### **10.4.2. Vazão**

As vazões decorrentes dos testes de bombeamento dos poços concluídos nos arenitos do Grupo Caiuá, em sua maioria, obtiveram valores menores que  $10 \text{ m}^3/\text{h}$ , porém, conforme mostra o histograma de frequência da Figura 61, alguns poços obtiveram vazões superiores, de até cerca de  $50 \text{ m}^3/\text{h}$ .

As áreas hachuradas exibidas no mapa de vazões da Figura 62 delimitam zonas com altos valores para esta variável. Eventualmente estas zonas são delimitadas por estruturas do arcabouço comum ao embasamento e a superfície da Bacia Bauru, entretanto níveis com maiores vazões também são posicionados sobre estruturas, em cruzamentos de estruturas NW-SE e NE-SW e, com menor frequência, na forma de picos anômalos sem relação com estas feições. Um exemplo de cruzamento de estruturas que corresponde a incremento de vazão pode ser visto na porção centro-nordeste da área (Figura 62).

#### **10.4.3. Capacidade específica**

O cálculo da capacidade específica permite estimar a relação entre a vazão de bombeamento da água, em  $\text{m}^3/\text{h}$  por metro de rebaixamento do nível dinâmico. Desta forma, as melhores condições de exploração são aquelas que apresentam os maiores valores para a capacidade específica.

Conforme mostra o histograma de frequência (Figura 63), apesar da maioria dos valores ficarem abaixo de  $0,5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ , alguns poços alcançam resultados superiores a  $4 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ , permitindo um bombeamento mais efetivo, resultando em ganho de vazões.

O mapa de capacidade específica (Figura 64), mostra as zonas com maiores valores marcadas por hachuras, principalmente a noroeste, nordeste, centro-sul e centro-este, e em zonas eventualmente limitadas por estruturas que cortam o embasamento e a superfície dos arenitos. Algumas interseções destas estruturas também apresentam incrementos de capacidade específica,

como pode ser observado na porção centro-sudeste da área (cruzamento de estruturas NW-SE e NE-SW).

#### **10.4.4. Sólidos totais dissolvidos**

Os teores de STD encontrados concordam com as análises de Celligoi (2000), com média de 75,36 mg/L para águas procedentes dos arenitos do Grupo Caiuá. O histograma de frequência (Figura 65), revela, porém, teores de STD superiores a 200 mg/L, com máximo de 361,8 mg/L. Como altas concentrações de STD não são comuns às águas do Sistema Aqüífero Caiuá, sendo características das águas do Sistema Aqüífero Serra Geral (Celligoi, 2000), tais concentrações, superiores a média, foram interpretadas como decorrentes de misturas de águas dos sistemas aqüíferos referidos.

O mapa de teores de STD (Figura 66), que exhibe as zonas com maiores concentrações marcadas por hachuras, mostra que as mesmas estão diretamente relacionadas com o arcabouço estrutural. Assim, podem ser observados blocos romboédricos que encerram maiores e menores teores (noroeste, nordeste e porção central da área), zonas com elevados teores de STD posicionados sobre estruturas, ou no cruzamento delas (NW-SE e NE-SW) e, esporadicamente, anomalias que aparentemente não apresentam nenhuma relação com o arcabouço estrutural.

#### **10.4.5. Potencial hidrogeniônico**

O potencial hidrogeniônico não denota caráter distintivo entre as águas típicas do Sistema Aqüífero Caiuá, daquelas decorrentes de mistura com o Sistema Aqüífero Serra Geral, de acordo com Celligoi e Duarte (1994 *apud* Celligoi, 2000), uma vez que as médias de pH dos mencionados sistemas giram em torno de 6,7. Entretanto, foi possível constatar variações de pH no interior da área de estudo, tendo-se verificado que zonas de elevados valores coincidem com tratos de maiores teores de STD. A média foi de 6,48 e os limites máximo e mínimo variaram em torno de 2 unidades (Tabela 6).

O mapa do pH (Figura 67) mostra apenas duas zonas com concentrações elevadas, limitadas por tendências do arcabouço estrutural

(região noroeste e porção central da área), não se verificando tal correspondência no restante da área.

#### 10.4.6. Hidroquímica

Conforme mostra o diagrama modificado de Piper da Figura 68, das 46 amostras analisadas (Celligoi, 2000), apenas 14 delas apresentaram caráter predominantemente potássico. Esta característica hidroquímica do Sistema Aquífero Caiuá é decorrente, segundo Rosa Filho *et al.* (1987), da contribuição dos feldspatos potássicos (microclínio), principais fornecedores de íons  $K^+$  para as águas subterrâneas. O restante das amostras apresenta teores variados dos cátions maiores ( $K^+$ ,  $Na^+$  e  $Mg^{++}+Ca^{++}$ ), posicionadas na região central do diagrama de Piper (Figura 68).

No mapa de composição ternária da Figura 69, os dados hidroquímicos são apresentados de forma regionalizada, seguindo o padrão do diagrama de Piper modificado (descrito por Rosa Filho *et al.*, 1987). Desta forma, com as amostras georreferenciadas, foi possível analisar o comportamento destas variáveis em correspondência ao arcabouço estrutural.

Neste mapa as zonas de cor verde representam águas enriquecidas em  $K^+$  (marcadas por hachuras contínuas). A porção hachurada (tracejada), onde não existe informação (fundo branco), foi inferida na tentativa de conectar as porções que exibem águas com assinaturas potássicas. É perceptível, também, no mapa da Figura 69, constatar relações entre elevados teores de  $K^+$  e maiores espessuras dos arenitos do Grupo Caiuá, na porção centro-sudoeste da área.

Embora as águas enriquecidas em  $K^+$  estejam localizadas em sua maioria na porção centro-sudoeste da área (zona hachurada), outros três núcleos potássicos são indicados no mapa da Figura 69, um a norte e os outros no centro-leste e a sul da área. As demais amostras mostram contribuições variadas dos cátions  $Na^+$ ,  $Ca^{++}$  e  $Mg^{++}$ , denotando misturas de águas de ambos os sistemas aquíferos. Conforme Rosa Filho *et al.* (1987), o sódio e o magnésio contidos nas águas do Sistema Aquífero Serra Geral são provenientes da dissolução dos plagioclásios e dos piroxênios dos basaltos,

respectivamente. Como os arenitos do Grupo Caiuá não apresentam em sua composição mineralógica tais minerais, contribuições destes elementos em suas águas são interpretadas como provenientes das rochas basálticas (Formação Serra Geral), as quais também guardam relações espaciais com zonas elevadas de pH e STD.

Os teores de cálcio encontrados nas águas não são naturalmente provenientes dos arenitos. No contexto das duas unidades geológicas envolvidas, o cálcio dissolvido nas águas provém da dissolução da calcita, presente principalmente nos basaltos da Formação Serra Geral (Rosa Filho *et al.*, 1987). Entretanto, porções basais dos arenitos do Grupo Caiuá, freqüentemente, apresentam cimentação carbonática (Fernandes 1992), bem como concreções do mesmo material. A presença do cátion  $\text{Ca}^{++}$  não se presta, então, para a distinção entre as águas provenientes dos dois sistemas aquíferos, indicando apenas a existência de material carbonático na rocha.



## 11 Conclusões

A utilização de técnicas modernas de processamento de dados aeromagnéticos como gradiente horizontal, amplitude e fase do sinal analítico e Deconvolução de Euler, aplicadas a dados coletados a 450 m de altura e simulados para diversas níveis de vôo (1000, 2000 e 4000 m), em áreas fortemente magnetizadas, mostraram-se eficazes no delineamento do arcabouço estrutural-magnético e nas estimativas de profundidades das fontes do embasamento da Bacia Bauru no noroeste do estado do Paraná.

Na tentativa de estabelecer um modelo estrutural para a superfície do Grupo Caiuá, foi procedida uma análise multitemática baseada na interpretação de lineamentos a partir do modelo numérico de terreno, imagens Landsat 7 e rede de drenagem. Desta forma, e com o objetivo de delinear a compartimentação e as zonas de conectividade hidráulica dos sistemas aquíferos Caiuá (SAC) e Serra Geral (SASG), tais arcabouços estruturais foram harmonizados em um modelo representativo das estruturas comuns ao Grupo Caiuá e a Formação Serra Geral, revelando um padrão em blocos romboédricos, limitados por estruturas nas direções NW-SE, NE-SW e E-W. A ausência de lineamentos magnéticos na direção N-S, bem delineados na análise multitemática já referida, foi devida principalmente ao paralelismo com as linhas de vôo e ao micronivelamento.

A partir da boa correlação linear entre as cotas e os níveis estáticos dos poços ( $R=0,98$ ), o cálculo da superfície potenciométrica através de krigagem com tendência externa do modelo numérico de terreno mostrou-se eficaz, conforme revelou o resultado da validação cruzada, com correlação linear também de  $R=0,98$ , entre os valores do nível estático medidos e estimados pelo mencionado método de interpolação.

A distribuição espacial das demais variáveis hidrogeológicas (vazão e capacidade específica) e hidroquímicas (pH, STD e cátions –  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{++}$  e  $\text{Ca}^{++}$ ) mostrou nítido condicionamento ao arcabouço estrutural comum. Desta forma, maiores vazões e capacidades específicas são delimitadas ora por

blocos romboédricos balizados por estruturas nas direções NW-SE e NE-SW, principalmente, ora alinhadas segundo as citadas direções.

Do mesmo modo, observou-se boa correlação entre a distribuição espacial do pH e dos teores de STD com o arcabouço estrutural comum. Assim, foram delineadas maiores concentrações destas variáveis nos extremos noroeste, sudoeste, leste e centro da área de estudo.

O diagrama de Piper modificado, envolvendo 46 amostras, mostrou que apenas 14 delas apresentaram caráter predominantemente potássico. Esta característica hidroquímica do Sistema Aquífero Caiuá (SAC) é decorrente da contribuição dos feldspatos potássicos do Grupo Caiuá (microclínio), considerados como os principais fornecedores de  $K^+$  para o SAC. O restante das amostras exibe contribuições variadas dos demais cátions ( $Na^+$ ,  $Mg^{++}$  +  $Ca^{++}$ ) denotando contaminação das águas do SAC pelo Sistema Aquífero Serra Geral (SASG).

A espacialização do mencionado diagrama de Piper, através de composição ternária RGB, permitiu avaliar o comportamento destas variáveis em correspondência ao arcabouço estrutural. Desta forma foi possível delinear compartimentos predominantemente potássicos (cor verde) no centro-oeste da área, assim como estabelecer suas relações com as maiores espessuras do Grupo Caiuá. As áreas representadas pelas demais cores indicam contaminações do SAC pelo SASG, através de diferentes taxas de mistura, do mesmo modo compartimentadas estruturalmente, indicando zonas de conectividade hidráulica entre os mencionados sistemas aquíferos, através de fraturas e em condições potenciométricas favoráveis. Em tais áreas de conexão hidráulica o sódio e o magnésio são decorrentes da dissolução de plagioclásios sódicos e dos piroxênios, respectivamente, ambos provenientes dos basaltos da Formação Serra Geral. Já o cálcio presente nestas áreas pode ser interpretado como originário tanto da Formação Serra Geral (dissolução da calcita) quanto de níveis basais do Grupo Caiuá, com cimentação carbonática.

## 12 Referências bibliográficas

ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y. **O Pré-Cambriano do Brasil**. São Paulo: Edgar Blücher, 1983.

ALMEIDA, F. F. M. Distribuição Regional e Relações Tectônicas do Magmatismo Pós-Paleozóico no Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, vol 16, n. 4, p. 325-349, 1986.

BARISON, M.R. **Estudo Hidrogeoquímico da Porção Meridional do Sistema Aquífero Bauru no Estado de São Paulo**. Rio Claro, 2003. 153 p. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.

BRIGGS, I. C. Machine Contouring Using Minimum Curvature. **Geophysics**, v. 39, n. 01, p 39-48. 1974.

CELLIGOI, A. **Hidrogeologia da Formação Caiuá no Estado do Paraná**. São Paulo, 2000. 95 p. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

COUTO, E. A., SILVA, R. B. **Reconhecimento da Anomalia Morfológica de Umarama: Bloco 2**. São Paulo: Consórcio CESP/IPT - Paulipetro, 1990. 05 p. Relatório Final. Rel BP-015/80.

CPRM, 2001. GEOLOGIA, TECTÔNICA E RECURSOS MINERAIS DO BRASIL: SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS - SIG E MAPAS NA ESCALA 1:2500000. Brasília. 04 CDs-ROM.

DEBEGLIA, N.; CORPEL, J. Automatic 3-D Interpretation of Potential Field Data Using Analytic Signal Derivatives. **Geophysics**, n.62, p. 87-96, 1997.

FERNANDES, L. A., COIMBRA, A. M. A Bacia Bauru (Cretáceo Superior, Brasil). **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, n. 68, v. 02, p. 195-205, 1996.

FERNANDES, L. A. **A Cobertura Cretácea Suprabasáltica no Paraná e Pontal do Paranapanema (SP): Os Grupos Bauru e Caiuá.** São Paulo, 1992. 129 p. Dissertação (Mestrado em Geologia Sedimentar) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

FERREIRA, F. J. F.; FORLIN, M.; STELLFELD, M. C.; CAMPOS, A. F. Assinaturas Magnética e Geomórfica do Domo de Umuarama – PR. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 6<sup>th</sup>, 1999, Rio de Janeiro. 1 CD-ROM.

FERREIRA, F. J. F. **Alinhamentos Estruturais – Magnéticos da Região Centro Oriental da Bacia do Paraná – Reavaliação da Potencialidade e Prospectividade em Hidrocarbonetos.** São Paulo: Consórcio CESP-IPT – Pauliopetro, 1982a. 23 p. Relatório Técnico.

FERREIRA, F. J. F. **Integração de Dados Aeromagnéticos e Geológicos: Configuração e Evolução Tectônica do Arco de Ponta Grossa.** São Paulo, 1982b. 170 p. Dissertação (Mestrado em Geologia Geral e de Aplicação). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

GASPARETTO, N. V. L. **As Formações Superficiais do Noroeste do Paraná e Sua Relação com o Arenito Caiuá.** São Paulo, 1999. 117 p. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

GEOSOFT. Microlevelling Using Bi-directional Gridding. Geosoft Technical Note, 2 p., 2001.

GEOSOFT. Magmap – 2-D Frequency Domain Processing. Geosoft Technical Note, 34 p., 2001.

GEOSOFT. Euler 3d Deconvolution (v 5.1.5). Manual. Geosoft, 66 p., 2002.

GUNN, P. J. Linear Transformations of Gravity and Magnetics Fields. **Geophysical Prospecting**, n. 23. p 300-312, 1975.

HSU, S. K.; COPPENS, D.; SHYU, C. T. Depth to Magnetic Source Using the Generalized Analytical Signal. **Geophysics**, n. 63, p. 1947-1957, 1998.

HSU, S. K.; SIBUET, J. C.; SHYU, C. T. High-resolution Detection of Geologic Boundaries from Potential Field Anomalies: an Enhanced Analytic Signal. **Geophysics**, n. 61, p. 373-386, 1996.

IBGE. Carta do Brasil - **Folha Umarama**. Rio de Janeiro, 1978. 1 mapa. Escala 1:250.000.

LIMA, M. I. C. de. **Análise de Drenagem e seu Significado Geológico-Geomorfológico**. Belém. 2002. (inédito).

MILANI, E. J.; FACCINI, U. F.; SCHERER, C. M.; ARAÚJO, L. M.; CUPERTINO, J. A. Sequences and Stratigraphic Hierarchy of the Paraná Basin (Ordovician to Cretaceous), Southern Brazil. **Boletim IG-USP**, Série Científica, São Paulo, n. 29. 1998.

MILANI, E. J. **Evolução Tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu Relacionamento com a Geodinâmica Fanerozóica do Gondwana Sul-ocidental**. Porto Alegre, 1997. 254 p. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MILLIGAN, P. & GUNN, P. J. Enhancement and Presentation of Airborne Geophysical Data. **AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics**, n. 17, v. 2, p. 63-75, 1997.

MINTY, B. R. S. Simple Micro-leveling for Aeromagnetic Data. **Exploration Geophysics**, n. 22, p. 591-592, 1991.

NABIGHIAN, M. N. The Analytic Signal of Two-dimensional Magnetic Bodies with Polygonal Cross-section: Its Properties and Use for Automated Anomaly Interpretation. **Geophysics**, n. 37, p. 507-517, 1972.

NABIGHIAN, M. N. Additional Comments on the Analytic Signal of Two-dimensional Magnetic Bodies with Polygonal Cross-section. **Geophysics**, n. 39, p. 85-92, 1974.



NABIGHIAN, M. N. Toward a Three-dimensional Automatic Interpretation of Potential Field Data Via Generalized Hilbert Transform: Fundamental Relations. **Geophysics**, n. 49, p. 780-786, 1984.

OMS (1998) Guidelines for drinking-water quality, 2nd ed. Addendum to Vol. 2. **Health criteria and other supporting information**. Geneva, World Health Organization. Disponível em: <[http://www.who.int/docstore/water\\_sanitation\\_health/GDWQ/Updating/draftguidel/draftchap87.htm](http://www.who.int/docstore/water_sanitation_health/GDWQ/Updating/draftguidel/draftchap87.htm)> Acesso em: 21 jun. 2004.

PETROBRAS. Projeto Aerogeofísico Rio Ivaí: Consórcio CESP/IPT, Paulipetro (dados digitais), 1980.

PORTELA FILHO, C. V. **Condicionamento Estrutural-Magnético do Sistema Aquífero Serra Geral na Região Central do Arco de Ponta Grossa (Bacia do Paraná) e sua Conectividade com o Sistema Aquífero Guarani**. Curitiba, 2003. 128 p. Dissertação (Mestrado em Geologia Exploratória). Departamento de Geologia. Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. (inédito).

REID, A.B., ALLSOP, J.M., GRANSCR, H., MILLCLT, A.J., SOMERTON, I.W. Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. **Geophysics**, n. 55, p. 80-91, 1990.

ROEST, W. R.; VERHOEF, J.; PILKINGTON, M. Magnetic interpretation using 3-D analytic signal. **Geophysics**, n. 57, p. 116-125, 1992.

ROSA FILHO, E. F. da. **Uma Análise Sobre a Produtividade dos Poços Tubulares no Aquífero Caiuá – Região Noroeste do Estado do Paraná**. Recife, 1982. Dissertação de Mestrado. Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Pernambuco.

ROSA FILHO, E. F. da, SALAMUNI, R., BITTENCOURT, A. V. L. Contribuição ao Estudo da Águas Subterrâneas nos Basaltos no Estado do Paraná. **Boletim Paranaense de Geociências**, n. 37, p. 22-52, 1987.

SANEPAR. 2002. Banco de Dados Hidrogeológico (arquivo digital).

SOARES, P. C. E FIORI, A. P. Lógica e Sistemática na Análise e Interpretação de Fotografias Aéreas em Geologia. **Notícia Geomorfológica**, vol. 16, n. 32: p 71-104, 1976.

SOARES, P. C. Tectônica Sinsedimentar cíclica na Bacia do Paraná: controles. Curitiba, 1991. 148 p. **Tese de Titular**. Universidade Federal do Paraná.

SUDERHSA. 2002. Banco de Dados Hidrogeológico (arquivo digital).

THOMPSON, D. T., EULDPH: A New Techique for Making Computer-assisted Depth Estimates from Magnetic Data. **Geophysics**, n. 47, p. 31-37, 1982.

THURSTON, J. B. & SMITH, R. S. Automatic Conversion of Magnetic Data to Depth, Dip, and Susceptibility Contrast Using SPI (TM) Method. **Geophysics**, n. 62, p. 807-813, 1997.

ZALÁN, P. V.; WOLFF, S.; CONCEIÇÃO, J. C. J.; ASTOLF, M. A. M.; VIEIRA, I. S.; APPI, V. T.; ZANOTTO, O. A. Tectônica e Sedimentação da Bacia do Paraná. In: SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA, III, 1987, Curitiba: Sociedade Brasileira de Geologia, v.1, p. 441-473.